

REPORT

ABSCHLUSSBERICHT FÜR DAS ANWENDUNGSPROJEKT 16 - „KÜSTENSCHUTZ UND GEOTHERMIE“

Datenauswertung, Planung, Wirtschaftlichkeit

Jan Kuhlmann, Jens-Uwe Kühl, Martin Uebigau, Björn Oldorf, Karsten Janßen

RADOST-Berichtsreihe
Bericht Nr. 29
ISSN: 2192-3140

Kooperationspartner

	Büro für Umwelt und Küste, Kiel BfUK		Leibniz-Institut für Gewässer- ökologie und Binnenfischerei, Berlin IGB
	Geographisches Institut der Christian Albrechts-Universität zu Kiel CAU		Leibniz-Institut für Ostseefor- schung Warnemünde IOW
	Coastal Research & Management, Kiel CRM		Institut für ökologische Wirt- schaftsforschung, Berlin IÖW
	Ecologic Institut, Berlin (Koordination) Ecologic		Landesbetrieb Küstenschutz, Nationalpark und Meeres- schutz Schleswig-Holstein, Husum LKN
	EUCC – Die Küsten Union Deutschland, Warnemünde EUCC-D		Landesamt für Landwirt- schaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein LLUR
	GICON – Großmann Ingenieur Consult GmbH – Niederlassung Rostock GICON		Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg StALU MM
	H.S.W. Ingenieurbüro Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH, Rostock HSW		Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Braunschweig TI
	Helmholtz-Zentrum Geesthacht Zentrum für Material- und Küstenforschung HZG		Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Wasserbau TUHH
	Institut für Angewandte Ökosystemforschung, Neu Broderstorf IfAÖ		Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau URCE

REPORT

ABSCHLUSSBERICHT FÜR DAS ANWENDUNGSPROJEKT 16 - „KÜSTENSCHUTZ UND GEOTHERMIE“

Datenauswertung, Planung, Wirtschaftlichkeit

Jan Kuhlmann
H.S.W. Ingenieurbüro

Jens-Uwe Kühl
H.S.W. Ingenieurbüro

Martin Uebigau
H.S.W. Ingenieurbüro

Björn Oldorf
H.S.W. Ingenieurbüro

Karsten Janßen
H.S.W. Ingenieurbüro

RADOST-Berichtsreihe
Bericht Nr. 29

ISSN: 2192-3140

Rostock, Juni 2014

Inhalt

1	Einleitung.....	7
2	Unterlagen/Protokolle	8
3	Ermittlung von Grundlagendaten	9
3.1	Beschreibung der Messstrecke	9
3.2	Ergebnisse der Messkampagne	12
3.2.1	Temperaturen im Untergrund und der Ostsee.....	12
3.2.2	Grund- und Meereswasserspiegel	14
3.2.3	Elektrische Leitfähigkeit des Grund- und Meerwassers	15
4	Prognose des geothermischen Potentials	20
4.1	Methodik und Vorüberlegungen	20
4.2	Grundlagen zur Oberflächennahen Geothermie und CO ₂ -Einsparpotential	22
4.3	Auswahl und Beschreibung der betrachteten geothermischen Quellsysteme	24
4.3.1	Thermische Horizontalbrunnen	24
4.3.2	Horizontale Erdwärmekollektoren	26
4.3.3	Vertikale Spiralkollektoren	28
4.4	Numerisches 3D-Modell.....	30
4.4.1	Modell-Eingangsdaten und Diskretisierung.....	30
4.4.2	Thermische und hydraulische Randbedingungen	33
4.4.3	Modellkalibrierung.....	35
4.5	Ergebnisse der thermohydrodynamischen Simulationen.....	38
5	Genehmigungsrechtliche Rahmenbedingungen zur geothermischen Nutzung.....	45
5.1	Allgemeine rechtliche Rahmenbedingungen	45
5.2	Vorhabensbezogene genehmigungsrechtliche Anforderungen	46
6	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	47
6.1	Investitionskostenschätzung.....	47
6.2	Betriebs- und Verbrauchskostenschätzung	49
6.3	Kurzbetrachtungen zur Wirtschaftlichkeit	50

7	Hinweise zum Entwurf bzw. zur Ausführung der Vorzugsvarianten.....	52
7.1	Thermische Horizontalbrunnen	52
7.2	Horizontale Erdwärmekollektoren.....	53
8	Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse und Entscheidungsleitfaden	55
8.1	Übertragbarkeit und mögliche Nutzungsstandorte.....	55
8.2	Entscheidungsleitfaden	56
9	Zusammenfassung und Ausblick	58
10	Anlagen.....	60

1 Einleitung

Begleitend zu den Fokusthemen "Küstenschutz" und "Erneuerbare Energien" wird im Rahmen von RADOST das Anwendungsprojekt 16 durchgeführt, das die technischen Möglichkeiten zur Gewinnung von Wärme oder Kälte aus dem Küstenbereich berücksichtigt. Darin soll aufgezeigt werden, wie die thermische Nutzung von in der Sättigungszone des Küstenbereichs vorhandenem "Strandwasser" (einem Gemisch aus Grund- und Meerwasser) oder die direkte thermische Nutzung des Meerwassers planerisch in Küstenschutzmaßnahmen integriert werden kann.

Küstenschutzanlagen dienen dem direkten Schutz von im Hinterland befindlichen Einrichtungen. Die zu schützenden Siedlungen und Bauten sind zu beheizen und teilweise auch zu kühlen. Hier kann die begleitende thermische Nutzung des Untergrundes/Meerwassers einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der CO₂-Emissionen und Betriebskosten leisten.

Die erforderlichen Grundlegendaten für eine Beurteilung der Möglichkeiten und des Potentials der thermischen Nutzung des Untergrundes bzw. des Meerwassers wurden durch ein eigens dafür eingerichtetes Messfeld für einen Zeitraum von 26 Monaten ermittelt. Dabei wurden die Parameter Untergrund- bzw. Wassertemperatur, hydrostatischer Druck und elektrische Leitfähigkeit kontinuierlich aufgezeichnet.

Die Vorplanung des Messfeldes wurde im Januar 2011 abgeschlossen [1]. Die Herstellung und Inbetriebnahme des Messfeldes erfolgte am 18.04.2011 [2]. Die am 16.09.2011 und 08.03.2012 erstellten Kurzberichte beschreiben die ausgelesenen Daten der Messstellen sowie den Zustand des Messfeldes zum jeweiligen Zeitpunkt [3, 4]. Die letzte Datenauslesung erfolgte am 09.07.2013.

Der nachfolgende Bericht beschreibt die Planung ausgewählter geothermischer Quellenanlagen im Bereich von Küstenschutzanlagen unter Berücksichtigung der gewonnenen Messdaten. Abschließend erfolgen eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und die Ableitung von Empfehlungen zur Umsetzung einer thermischen Nutzung des Untergrundes bzw. des Meerwassers.

2 Unterlagen/Protokolle

Für die Erstellung dieses Berichtes lagen u.a. folgende Dokumente/Daten vor:

- [1] 1. Zwischenbericht für das Anwendungsprojekt 16 „Küstenschutz und Geothermie“, Festlegung der Planungsregion und Vorplanung des Messfeldes (AP 1 und AP 2), H.S.W. GmbH, 30.11.2010,
- [2] 2. Zwischenbericht für das Anwendungsprojekt 16 „Küstenschutz und Geothermie“, Dokumentation zur Herstellung des Messfeldes (AP 3), H.S.W. GmbH, 13.05.2011,
- [3] 3. Zwischenbericht für das Anwendungsprojekt 16 „Küstenschutz und Geothermie“, Messdaten des ersten Betriebsquartals (AP 4), H.S.W. GmbH, 16.09.2011,
- [4] 4. Zwischenbericht für das Anwendungsprojekt 16 „Küstenschutz und Geothermie“, Messdaten des zweiten und dritten Betriebsquartals (AP 4), H.S.W. GmbH, 08.03.2012,
- [5] Wasserstände und Temperaturen der Ostsee vor Warnemünde, Internes Messnetz Küste (IMK), Messdaten bereitgestellt durch Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg (StALU MM) Dezernatsgruppe Küste,
- [6] Report, Internes Messnetz Küste und hydrographische Datenbank, Staatliches Amt für Umwelt und Natur, Dr. Lars Tiepolt, August 2009,
- [7] Protokoll zur Beratung am 19.06.2012, Thema: „Küstenschutz und Geothermie“, Ort: StALU MM, Teilnehmer: Dezernatsgruppe Küste, GICON, H.S.W. GmbH,
- [8] Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern - Grundlagen, Grundsätze, Standortbestimmung und Ausblick, Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz, erarbeitet durch StALU MM, Dezernatsgruppe Küste, Ausgabe März 2009,
- [9] Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern 3-9-4 - „Uferlängswerke - Geotextilwälle“, Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz, erarbeitet durch StALU MM, Dezernatsgruppe Küste, Ausgabe Dezember 2012,
- [10] EAK 2002 - Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken, korrigierte Ausgabe 2007, Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen,
- [11] LWaG Wassergesetz des Landes Mecklenburg-Vorpommern, 30.11.1992,
- [12] Technisches Merkblatt T4 Wärmequelle Oberflächenwasser, Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen, Schweiz, Ausgabe 2007,
- [13] VDI-Richtlinie 4640 Blatt 4 Thermische Nutzung des Untergrundes - Direkte Nutzungen, Herausgeber: VDI-Gesellschaft Energietechnik, Ausgabe Sept. 2004,
- [14] Diverse Angebote und Preisinformationen zu Wärmetauschern, Pumpen, Brunnen (Datenbestand H.S.W. GmbH),
- [15] Verband deutscher Ingenieure, Entwurf Richtlinie VDI 4640 Blatt 1 und Blatt 2,
- [16] Leitfaden Erdwärmesonden in Mecklenburg-Vorpommern, LUNG, 2006,
- [17] BARLOW, PAUL M., Groundwater in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2003,

[18] Dengler, Cindy: Untersuchungen zur technischen Kombinationsmöglichkeit von Küstenschutz- und Geothermieranlagen, Diplomarbeit, Universität Rostock, 16.03.2009,

[19] Verbundprojektberichte: Regionale Anpassungsstrategien für die Ostseeküste (RADOST) der Projektjahre 2009-2014, Ecologic Institut gemeinnützige GmbH, Berlin.

3 Ermittlung von Grundlagendaten

3.1 Beschreibung der Messstrecke

Die erforderlichen Grundlagendaten für eine Beurteilung des Potentials der thermischen Nutzung des Untergrundes im Küstenbereich bzw. des Meerwassers wurden durch eine eigens dafür von der H.S.W. GmbH eingerichtetes Messfeld bestehend aus vier Messstellen (multifunktionales Sensorsystem, eingebracht in Filterrohren) über einen Zeitraum von 26 Monaten ermittelt werden (Abb. 1 und Abb. 2). Der Einbau der Messstellen (Mst.) wurde im April 2011 abgeschlossen, das Auslesen der mittels Sensorsystem gewonnenen Messdaten (Abb. 3) erfolgte quartalsweise bzw. halbjährig bis zum 09.07.2013.

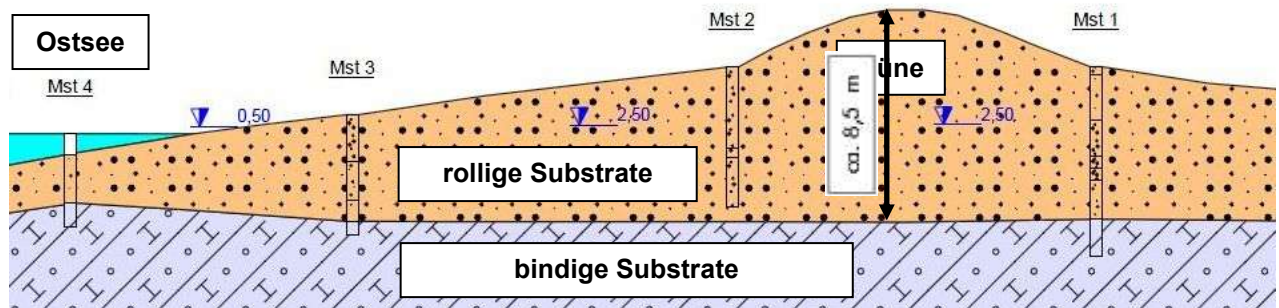


Abb. 1: Profilschnitt von Norden nach Süden, Lage der Messstellen in Warnemünde

Auf einer Gesamtlänge von ca. 175 m wurden die Parameter Temperatur, hydrostatischer Druck und elektrische Leitfähigkeit mittels Sensoren erfasst und in einem integrierten Festspeicher abgelegt. Landseitig werden die genannten Parameter im oberen, nicht abgedeckten Grundwasserleiter erfasst. Die Pegelmessstellen reichen bis max. bis ca. 6 m unter Gelände.

Die Messung erfolgt mittels Datenloggern vom Typ *CTD-DIVER* (Hersteller *Schlumberger Water Services*) aus keramischem Material, welche in der jeweiligen Messstelle in einer vorher festgelegten Tiefe positioniert werden. Ein Adapterkabel stellt die Verbindung zwischen dem Datenlogger und dem Auslesekopf her. An die Ausleseschnittstelle wird ein Auslesegerät zur Übernahme der gespeicherten Daten aufgesteckt.

Die ausführliche Beschreibung der geologischen/hydrogeologischen Situation sowie der spezifische Ausbau der realisierten Messstellen und weitere technische Details sind dem 1. und 2. Zwischenbericht [1, 2] zu entnehmen.

Die in den landseitigen Messstellen 1 bis 3 installierten Datenlogger funktionierten seit ihrer Inbetriebnahme stets ordnungsgemäß. Die ursprünglich errichteten wasserseitigen Mst. 4 und 5 wurden im Herbst 2011 durch Wellentätigkeit zerstört und im Februar 2012 durch eine besser geschützte und zusätzlich verankerte Variante ersetzt (Mst. 4 neu, siehe Abb. 3 und 4).

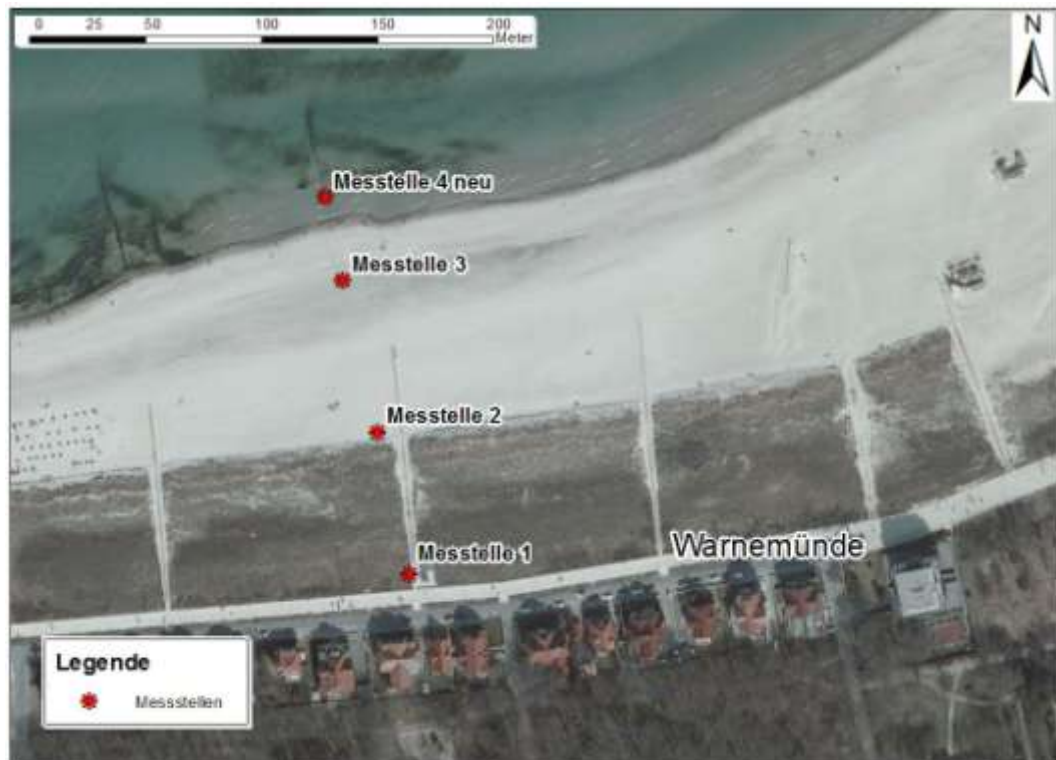


Abb. 2: Lageplan der Messstellen 1 bis 4 am Strand von Warnemünde (Luftbild: GAIA M-V)

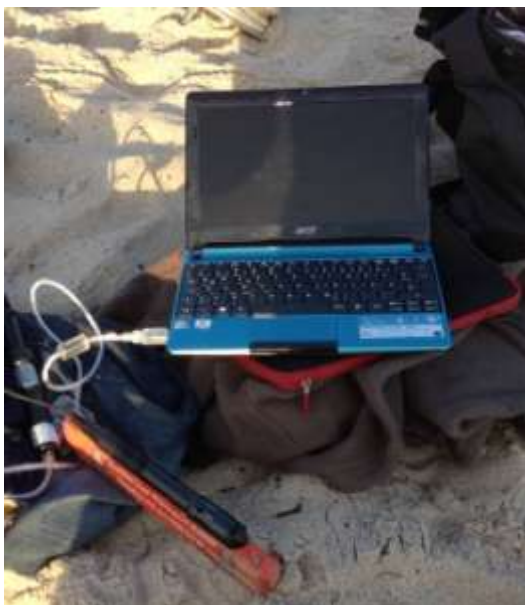


Abb. 3 links: Auslesung der Messdaten im Sommer 2012, **rechts:** neu errichtete Messstelle 4

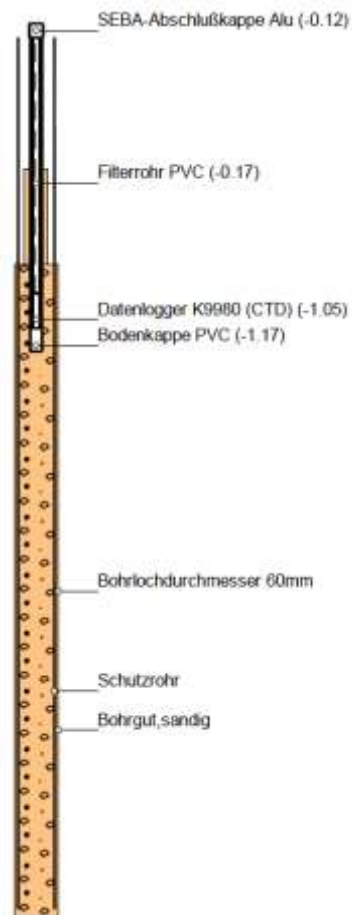


Abb. 4 links: Ausbau der neuen Messstelle 4; **rechts:** Stahl-Schutzrohr und Einbau der Messstelle.

Zur Interpretation der Messergebnisse sind die nachfolgend aufgeführte Messtiefe und die Einbausituation der Sensoren von entscheidender Bedeutung (Tab. 1):

Tab.1: Messstellen, Messtiefe und Einbausituation

Messstelle	Messtiefe in m unter GOK bzw. unter Wasserspiegel	Einbausituation
1 (Promenade)	3,8	ca. 1,3 m im Grundwasser,
1 (Bodenluft)	0,6	Luftdruck- und Temperaturmessung im luftgefüllten Schacht
2 (Düne)	4,4	ca. 2,1 m im Grundwasser
3 (Strand)	2,8	ca. 1,7 m im <i>Strandwasser</i> , tlw. Wellenaufschlagbereich
4 (Wasser)	1,4 (Mittelwert)	Messung am Ostseeboden, ca. 15 m vom Strand entfernt
IMK Warnemünde	3,0 (Mittelwert)	Messung am Ostseeboden, ca. 250 m vom Strand entfernt

3.2 Ergebnisse der Messkampagne

3.2.1 Temperaturen im Untergrund und der Ostsee

Zur weiteren Interpretation der gewonnenen Messdaten wurden durch das Staatliche Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg (*StALU MM*) Messdaten des *Internen Messnetz Küste* - Pegel Warnemünde - bereitgestellt [5, 6]. Der Messpegel Warnemünde befindet sich ca. 250 m vom Strand entfernt im Bereich der Ostsee. In einer Tiefe von ca. 0,5 m über dem Meeresgrund wird sie im Mittel von einer ca. 3 m messenden Wassersäule überdeckt.

Die gemessenen Wasser- bzw. Untergrundtemperaturen sind in Abb. 5 dargestellt. Erwartungsgemäß schwankt die Temperatur im Jahresgang, der seeseitige Pegel *IMK Warnemünde* und die im Bereich der Buhnen installierte Mst. 4 zeigen die größten Amplituden. Auch die im luftgefüllten Revisionsschacht der Mst. 1 (Promenade) in einer Tiefe von ca. 0,6 m u. GOK eingehängte Messsonde (Referenzdruckmessung, sogenannter „Barodiver“) zeigt eine deutliche Korrelation zu den Temperaturen der Ostsee. Die Variabilität nimmt mit der Einbautiefe der Sensoren grundsätzlich ab. Demnach weist der am tiefsten messende Logger (Mst. 2 *Düne*, ca. 4,4 m u. GOK) die geringste Schwankungsbreite auf.

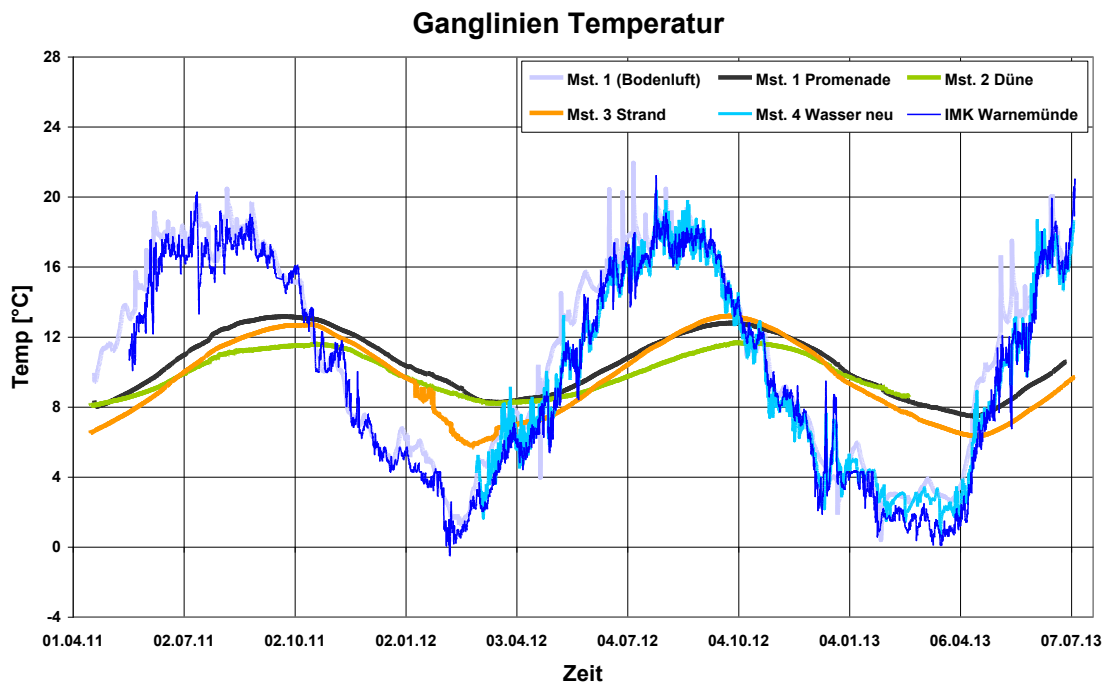


Abb. 5: Ganglinien der gemessenen Wasser- bzw. Untergrundtemperatur, siehe auch Anlage 1

Insgesamt ca. 2 Monate verzögert reagieren die landseitigen Mst. 1 bis 3 auf saisonale Temperaturänderungen. Schwankungen im Tages- und Wochenmaßstab erreichen die Datenlogger nicht.

Die „Ausreißer“ der in Mst. 3 *Strand* gemessenen Temperaturen um Januar 2012 sind vermutlich auf Sturmereignisse zurückzuführen, die zu einem verstärkten Seewassereinbruch in die Messstelle geführt haben.

Für die Planung von Geothermieranlagen im Bereich von Küstenschutzanlagen lassen sich aus den aufgezeichneten Temperaturverläufen u.a. folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Eine direkte thermische Nutzung von Grund- bzw. *Strandwasser* mittels Brunnen zur passiven Kühlung und wärmepumpengestützten Beheizung von Gebäuden lässt sich unter Berücksichtigung des nachgewiesenen günstigen saisonalen Temperaturverlaufes voraussichtlich mit hoher Effizienz realisieren (vgl. auch Abb. 4, Ganglinien Mst. 1 und Mst. 2).
- Die direkte thermische Nutzung von Ostseewasser mittels Brunnen oder indirekte Nutzung durch geschlossene Wärmeübertrager ist nur mit Einschränkungen möglich, da die am strandnahen Meeresgrund und in der Ostsee gemessenen Wassertemperaturen im Sommer ein vergleichsweise hohes und im Winter ein zu niedriges Niveau erreichen (vgl. auch Abb. 4, Ganglinien Mst. 4 und *IMK Warnemünde*).
- Für die saisonal wechselnde Nutzung der oberflächennahen Geothermie zum Heizen und Kühlen mittels geschlossener Wärmeübertrager wie z.B. Erdwärmekollektoren wurden im Tiefenbereich von ca. 2,5 bis 4,5 m unter Geländeoberfläche günstige Temperaturverhältnisse nachgewiesen (vgl. auch Abb. 4, Ganglinien Mst. 1 bis Mst. 3).

3.2.2 Grund- und Meereswasserspiegel

In den folgenden Abb. 6 und 7 sind die gemessenen Werte für den Wasserspiegel dargestellt. Zum Vergleich sind Messdaten des Ostseewassers mit aufgetragen, die am Pegel *IMK Warnemünde* registriert wurden [5].

In Abb. 6 ist ersichtlich, dass die im Bereich der Buhnen gemessenen Wasserspiegel (Mst. 4) und der *IMK Warnemünde* sehr gut korrelieren. Die in Mst. 4 erfassten Daten belegen einen durchschnittlich ca. 0,1- 0,2 m höheren Wasserspiegel bzw. höhere Wellen was in Bezug auf die Entfernung (ca. 250 m zum Strand) und Wassertiefe (ca. 3 m) des verglichenen Pegels *IMK Warnemünde* plausibel ist.

Die erste landseitige Messstelle (Mst. 3 *Strand*) wird vor allem durch die Schwankungen des Meeresspiegels beeinflusst und bildet diesen mit leicht verringerter Amplitude nach. Die vor- und hinter der Düne eingerichteten landseitigen Mst. 1 und 2 zeigen sowohl eine hydraulische Beeinflussung durch die Ostsee als auch durch das zuströmende Grundwasser aus dem Inland. So haben sich z.B. die Starkregenereignisse des Sommers im Jahr 2011 deutlich auf den Grundwasserstand aufgeprägt und diesen Ende Juli bis Mitte August 2011 im Mittel um über 0,5 m erhöht.

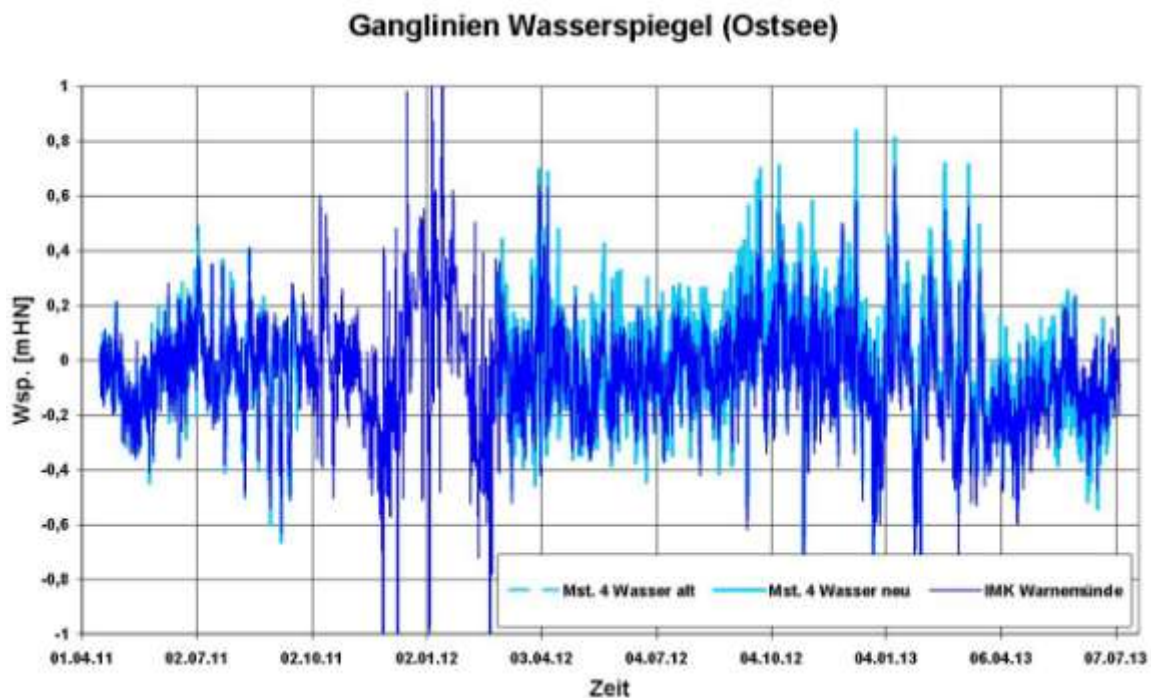


Abb. 6: Ganglinie des Wasserspiegels der Ostsee im Untersuchungszeitraum, siehe auch Anlage 1

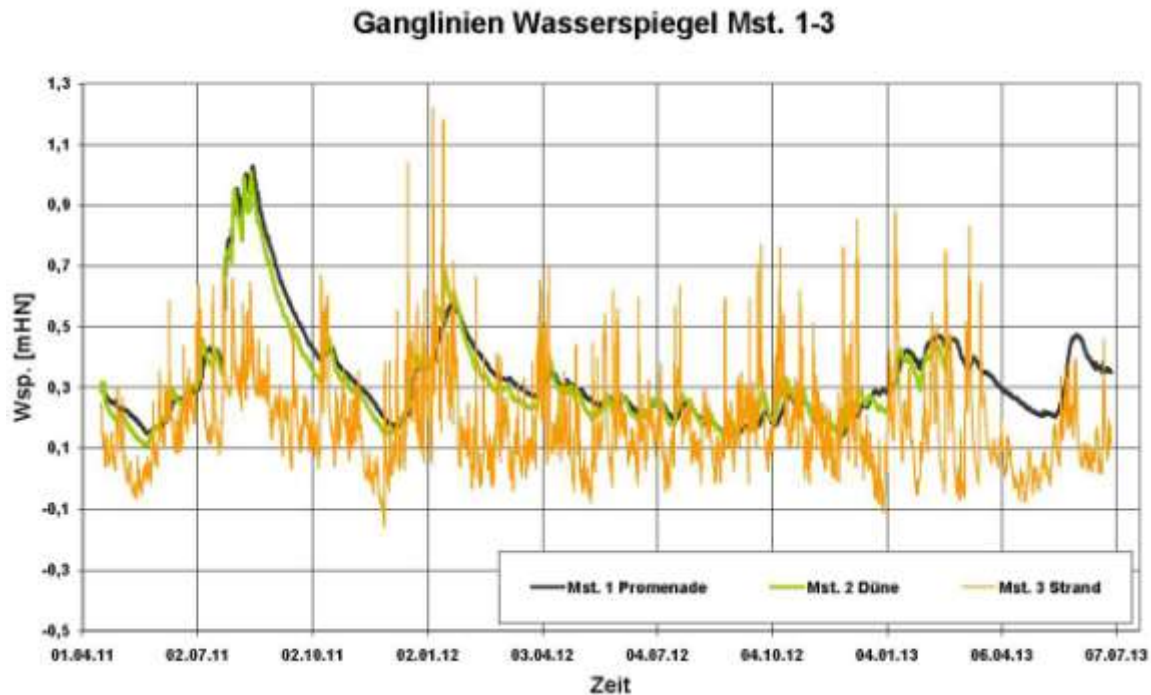


Abb. 7: Ganglinie des Grundwasserspiegels im Untersuchungszeitraum, siehe auch Anlage 1

Bei der Planung oberflächennaher geothermischer Quellsysteme wie Horizontalbrunnen oder Erdwärmekollektoren im Strand- bzw. Dünenbereich ist die mögliche Schwankungsbreite des Grundwasser- bzw. „Strandwasserspiegels“ zu beachten (vgl. auch Abb. 7), um einen Leistungsverlust oder einen Ausfall durch zeitweiliges „Trockenfallen“ zu vermeiden. Sichergestellt ist dies den Messergebnissen nach bei einer maximalen geodätischen Höhenlage der Wärmetauscher von ca. 0 m HN.

3.2.3 Elektrische Leitfähigkeit des Grund- und Meerwassers

Die an den Mst. 1 bis Mst. 4 gemessene elektrische Leitfähigkeit, die als Summenparameter für die Ionenanzahl dient, ist in Abb. 8 logarithmisch dargestellt. Der Parameter ermöglicht u.a. Aussagen zur *Salzwasserintrusion* an der Küste. Insbesondere bei der direkten thermischen Nutzung von Grund- bzw. Strandwasser ist der Salzgehalt für die richtige Materialauswahl (u.a. Filter, Wärmetauscher) von entscheidender Bedeutung.

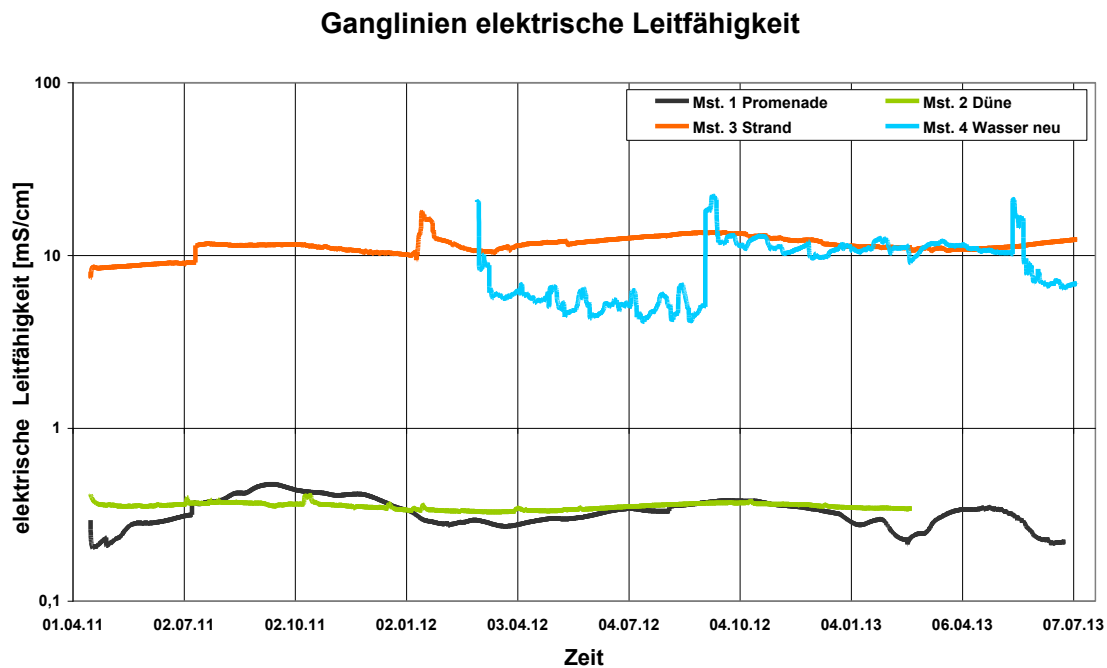


Abb. 8: Ganglinie der gemessenen spezifischen elektrischen Leitfähigkeit, siehe auch Anlage 1

Der Begriff *Salzwasserintrusion* bezeichnet das Eindringen von Salzwasser in Grundwasserleiter. Aufgrund der Dichteunterschiede von Salz- und Süßwasser findet der Vorgang natürlich statt. An der Kontaktzone strömt dichteres Salzwasser in das weniger dichte Grundwasser bis die Druckverhältnisse ausgeglichen sind (Abb. 9).

Auch eine übermäßige Grundwasserentnahme (z.B. mittels thermischer Brunnen) führt zur Intrusion. In diesem Fall wird durch die Absenkung des Grundwasserspiegels der hydrostatische Druck verringert, worauf ein landwärts gerichteter Druck des Salzwassers einen Ausgleich bewirkt. Das Ausmaß dieses Vorgangs wird durch die Entnahmerate, der Rate der Grundwasserneubildung, der Entfernung der Grundwasserentnahmestellen, den hydraulischen Eigenschaften des Grundwasserleiters und vom geologischen Schichtaufbau bestimmt. Sturmfluten können ebenfalls eine Salzwasserintrusion verursachen.

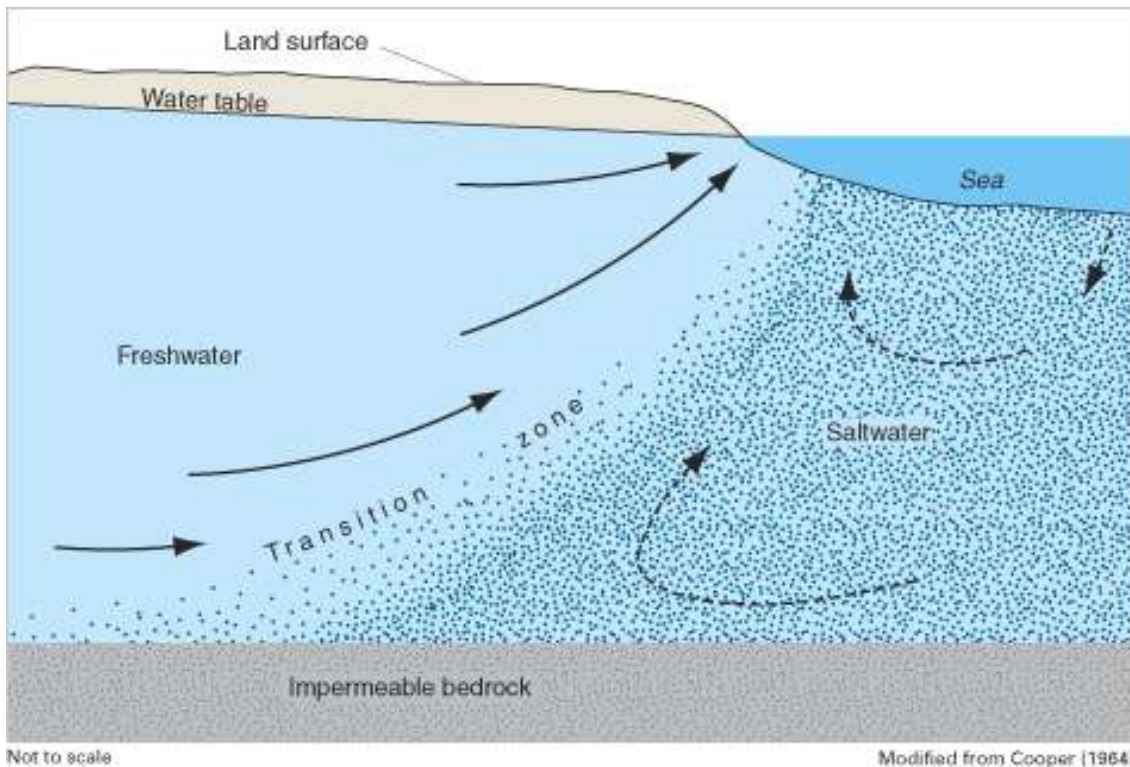


Abb. 9: Übergangszone zwischen Süßwasser und Salzwasser in Küstennähe, Quelle: BARLOW, PAUL M.

Die Mächtigkeit der Süßwasserzone bis zum Salzwasser lässt sich anhand der *Ghyben-Herzberg* Gleichung (1) abschätzen. Abb. 10 skizziert die Berechnungselemente.

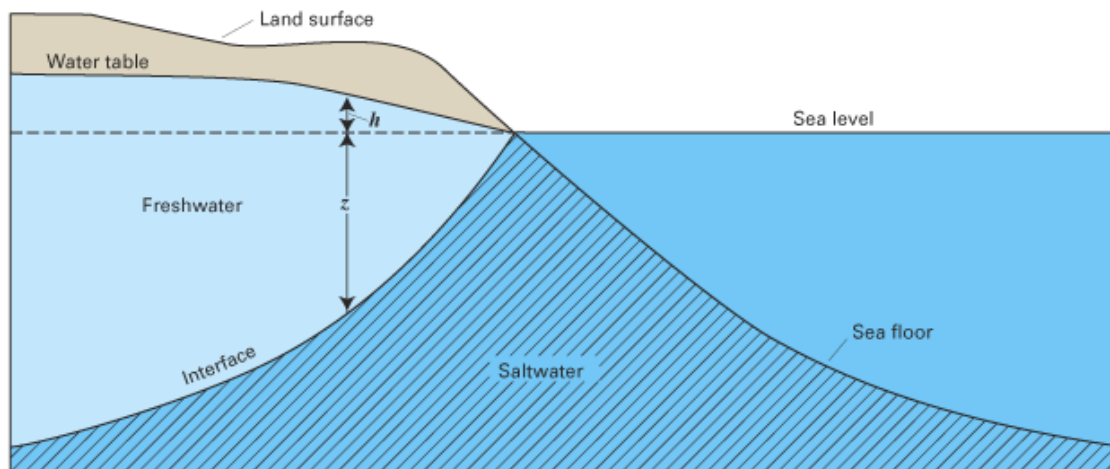


Abb. 10: Skizze zur Verdeutlichung der *Ghyben-Herzberg* Gleichung, Quelle: BARLOW, PAUL M.

(1)

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h$$

ρ_f = Dichte Süßwasser (1,000 g/cm³)

ρ_s = Dichte Salzwasser (1,025 g/cm³)

h = Mächtigkeit Süßwasserzone über NN

z = Mächtigkeit Süßwasserzone unter NN

Tab. 2 gibt eine Übersicht zu typischen spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten ausgewählter Wässer und ermöglicht damit eine erste Einschätzung der im Rahmen des Anwendungsprojektes gewonnenen Daten (Abb. 8 und Tab. 3).

Tab.2: Grenzwerte der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit ausgewählter Wässer

Wassertyp	spez. el. LF [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	Quelle
Grundwasser	30 - 2.000	Hölting/Coldewey
Trinkwasser (Grenzwert)	2.500	Hölting/Coldewey
Ostsee	24.000 - 46.000	IOW - Dr. Feistel
Meerwasser	45.000 - 55.000	Hölting/Coldewey

Tab. 3: Werte der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit der RADOST-Messstellen (Warnemünde)

MST	Min [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	Max [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	Mittelwert [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	Median [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	Modalwert [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	Zeitraum
MST 1	203	475	337	333	283	04/2011 - 07/2013
MST 2	328	414	354	356	369	04/2011 - 07/2013
MST 3	7.457	18.123	11.474	11.521	11.517	04/2011 - 07/2013
MST 4n	4.130	21.100	5.622	5.355	5.100	02/2012 - 07/2013

Mst. 1 und Mst. 2 befinden sich im Grundwasser. Schon deutlich erhöhte Leitfähigkeiten zeigt Mst. 3, die sich in der Brandungszone befindet. Mst. 4, welche sich im ständig überschwemmten Flachwasserbereich befindet zeigt sogar einen erheblich niedrigeren Mittelwert als Mst. 3.

Auf der Grundlage der beschriebenen *Ghyben-Herzberg*-Gleichung und der täglich gemessenen Grundwasserflurabstände der Messstellen erfolge eine Darstellung der Salzwasser-Süßwasser-Grenze für Hoch- und Niedrigwassersituationen (Abb. 11). Die berechneten Werte beziehen sich nur auf den oberen, ungespannten Grundwasserleiter. Der Bereich zwischen den beiden dargestellten Linien kann als Übergangszone zwischen Süßwasser und Salzwasser interpretiert werden.

Süßwasser-Salzwasser-Grenze oberer GWL

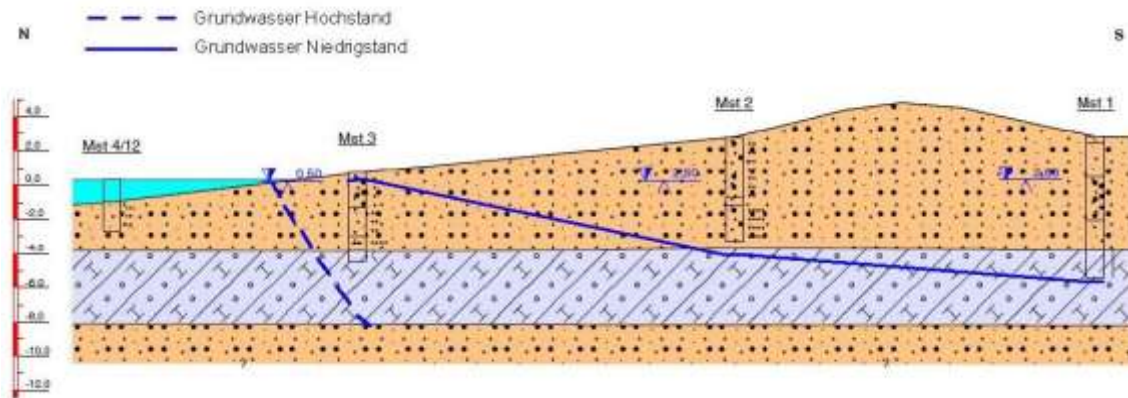


Abb. 11: Süßwasser-Salzwasser-Grenze des oberen Grundwasserleiters im Bereich des Messfeldes

Saisonal schwankende Werte der elektrischen Leitfähigkeit sind durch die Temperaturabhängigkeit des Parameters begründet. Mit steigender Temperatur nimmt die elektrische Leitfähigkeit zu. Besonders auffällig ist dieser Effekt in den Ganglinien der Mst. 1 und Mst. 3 (siehe Abb. 12).

Signifikante Sprünge im Messwert der Leitfähigkeit (vgl. Abb. 8) in der Mst. 3 sind sehr wahrscheinlich auf sturmbedingte Überflutungsereignisse zurückzuführen. In der neu errichteten Mst. 4 kam es während der gesamten Messkampagne zu drei deutlichen Wertesprüngen, die unmittelbar mit dem Einbau des Datenloggers und den weiteren Auslesungen vor Ort in Zusammenhang zu bringen sind (unterschiedliche Sandüberdeckung des Filterbereiches der Messstelle vor und nach dem Herausnehmen des Datenloggers).

Der Strandabschnitt von Mst. 3 liegt auf +0,73 m HN und weist eine Grundwasserleitmächtigkeit von 4,60 m auf. Während der Aufzeichnungsphase wurde der Bereich zehn Mal überflutet, stets in den Herbst- und Wintermonaten. Dabei wurde ein maximaler Wasserstand von +1,22 m HN erreicht. Während der Überflutungsphasen durch Salzwasser wurden keine signifikanten Änderungen der Leitfähigkeit registriert (vgl. Abb. 8).

Die aufgezeichneten Daten zeigen erhöhte Leitfähigkeiten von 7.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bis 18.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Obwohl die nach der *Ghyben-Herzberg* Gleichung berechnete Grenze zum Salzwasser bei durchschnittlich -7,48 m HN liegen soll, ist der gesamte Bereich der Messstelle Brackwasser. Dies könnte auf die Überflutungsereignisse zurück zu führen sein. Der Rückgang des Meerwassers und anschließende Verdunstung des salzwassergetränkten Strandabschnittes kann zu einer Akkumulation des Salzes in dem Bereich von Mst. 3 führen. Dafür spricht auch, dass Mst. 4, welche im dauerhaft überfluteten Flachwasserbereich errichtet wurde, deutlich niedrigere Leitfähigkeitskonzentrationen um durchschnittlich 5.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aufweist.

Der Wasserstand in Mst. 2 schwankt zwischen 0,10 m HN und 1,01 m HN. Nach der *Ghyben-Herzberg* Gleichung befindet sich die Grenze zwischen Salzwasser und Süßwasser somit bei -4,00 m HN bis -40,40 m HN.

In Mst. 1 schwankt der Wasserstand von +0,14 m HN bis +41,20 m HN. Die Süßwasser-Salzwasser Grenze liegt demnach bei -5,60 m HN bis -41,20 m HN. Mst. 2 ist somit ebenfalls ständig Süßwasser erfüllt.

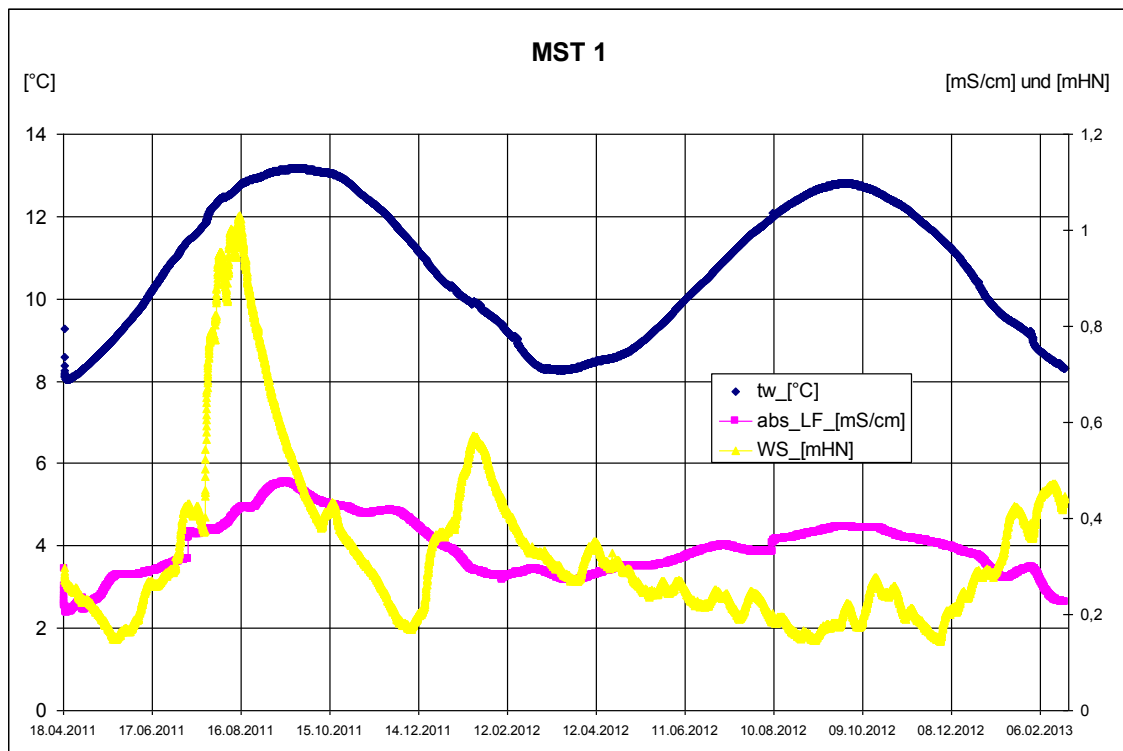


Abb. 12: Wasserstand, Temperatur und Leitfähigkeit von Mst. 1, siehe auch Anlage 1

4 Prognose des geothermischen Potentials

4.1 Methodik und Vorüberlegungen

Zur Ermittlung des thermischen Potentials des unmittelbaren Küsten-/Strandbereiches wurde basierend u.a. auf den gewonnenen Messdaten ein dreidimensionales numerisches Modell (*FEM*) des untersuchten Küstenabschnittes vor Warnemünde erstellt.

Innerhalb dieses Modells ist es möglich, verschiedene geothermische Quellsysteme (hier: horizontale Erdwärmekollektoren, vertikale Spiralwärmetauscher, Horizontalbrunnen) zu simulieren und deren potentielle Leistungsfähigkeit nachzuvollziehen bzw. iterativ zu ermitteln.

Als Simulator der Strömungs- und Transportmodellierung in porösen Medien diente das leistungsfähige Softwarepaket *FEFLOW 6.1* (*DHI-WASY*).

Die Anwendung numerischer Modelle bei der Nachbildung und Prognose von Grundwasserfließbewegungen sowie dem gekoppelten Transport von Wärme entspricht dem Stand des Wissens bzw. der Technik und erlaubt es, komplexe Transportvorgänge und Fließsysteme zu simulieren. Die Güte des Grundwassermodells wird im Wesentlichen von den verfügbaren geologischen und hydrogeologischen Eingangsdaten bestimmt.

Aufgrund der häufig nur beschränkten Aufschlussdichte und der nur punktuell vorhandenen Kennwerte muss die geologisch-hydrogeologische Modellvorstellung bzw. das darauf basierende numerische Grundwassermodell generalisiert werden. Insofern sind Abweichungen der Simulationsergebnisse von dem tatsächlich eintretenden thermohydrodynamischen Regime nicht auszuschließen.

Zukünftige Veränderungen des dem Modell implizierten Grundwasserfließregimes sind ebenfalls nicht auszuschließen. Wechsel des Strömungsbildes in Richtung und Betrag

können unter anderem durch größere Wasserhaltungen sowie langjährige Änderungen in der klimatischen Wasserbilanz oder durch küstendynamische Prozesse (Rückschnitt der Uferlinie oder progradierende Ufercharakteristik) verursacht werden.

Im Folgenden werden Vorüberlegungen und die Prämissen einer thermischen Nutzung des Untergrundes bzw. von Strandwasser für eine wirtschaftliche und umweltfreundliche Wärme- und Kälteversorgung im küstennahen Bereich zusammengefasst dargestellt:

- Ziel der thermischen Nutzung des Untergrundes im Bereich von Küstenschutzanlagen oder von Strandwasser ist eine möglichst hohe Wirtschaftlichkeit bei gleichzeitig geringem Betriebsrisiko und eine im Vergleich zu herkömmlicher Anlagentechnik maximale Einsparung an CO₂-Emissionen.
- Die Bemessung der thermischen Quellenanlagen ist neben den hydrologischen Standortfaktoren im Wesentlichen vom Betrag und Verhältnis der Jahresarbeit (Wärme, Kälte) sowie vom Betrag der maximalen Heiz- bzw. ggf. Kühllast abhängig, da bestimmte Temperaturlimits (s.u.) eingehalten werden müssen. Bemessungskriterien sind häufig die so genannten „peak loads“ für Heizen und ggf. Kühlen (Maximalabforderungen Heizen und Kühlen).
- Zulässige Temperaturänderungen: gemäß VDI-Richtlinie 4640 soll die Temperatur des zu den geschlossenen Wärmeübertragern (hier: Kollektoren) zurückkehrenden Wärmeträgermediums im Dauerbetrieb (Wochenmittel) den Grenzbereich von ± 11 K Temperaturänderung gegenüber der ungestörten Erdoberflächtemperatur nicht überschreiten; bei Spitzenlast soll ± 17 K Temperaturänderung nicht überschritten werden.
- Bemessungskriterium Heizen: Erfahrungsgemäß sollten für einen nachhaltigen und wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen (über einen Betrachtungszeitraum von mindestens 25 Jahren) mittlere Fluidtemperaturen im Spitzenlastbetrieb von -5 °C und im Grundlastbetrieb von 0 °C nicht unterschritten werden,
- Bemessungskriterium Kühlen: Vorzugsweise im „passiven“ Kühlbetrieb, bei Überschreitung der nutzbaren Kühltemperatur - Umschaltung auf „aktiven“ Kühlbetrieb, erfahrungsgemäß gilt eine maximale mittlere Fluidtemperatur für eine „aktive“ Kühlung von ca. 30 °C als wirtschaftlich und technisch sinnvolle Grenze,

⇒ Für die Simulation von horizontalen Erdwärmekollektoren und vertikalen Spiralkollektoren (geschlossener Solekreis, Fluid: Wasser mit 25 % Frostschutzmittel) wurde eine zulässige mittlere Fluidtemperatur im Bereich von **0 °C bis $+24$ °C** festgelegt.

⇒ Für die Simulation von horizontalen Brunnen (offenes System) wurde eine zulässige Quelltemperatur (Strandwasser, Ostseewasser) von **$+4$ °C bis $+24$ °C** festgelegt. Zusätzliches Abbruchkriterium ist eine Wasserspiegelabsenkung bis ca. $0,3$ m oberhalb des Brunnenfilters (hier bei ca. $-2,7$ m HN).

- Die für eine Bemessung insbesondere relevante Untergrund- und Wassertemperatur wird maßgeblich durch saisonale und klimatische Randbedingungen (Lufttemperatur, Niederschläge, Strahlung u.a.) bestimmt.
- Für die energieeffiziente wärmepumpengestützte thermische Nutzung des Untergrundes bzw. von Strandwasser sollte das gebäudeseitige Nutztemperaturniveau möglichst

niedrig gewählt werden (Vorlauftemperatur im Heizkreis $\leq 35\text{ °C}$). Optimale Nutztemperaturniveaus können zweckmäßigerweise durch Niedrigtemperatur-Heizungen, Industrieflächenheizung, Bauteilaktivierung, großflächige Lüftungsregister usw. erfolgen.

- Die im Sommer erwarteten maximalen Wassertemperaturen in der Ostsee von ca. 20 °C ermöglichen bei entsprechender Auslegung der gebäudeseitigen Kälteübertrager (u.a. Flächenkühlsysteme) auch eine „passive Kühlung“ ohne zusätzlichen Einsatz von Kompressionsmaschinen. Im Falle höherer Wassertemperaturen ($25\ldots 30\text{ °C}$) kann ggf. eine „aktive“ Kühlung mittels reversibler Wärmepumpe erfolgen.
- Die Wirtschaftlichkeit einer thermischen Nutzung des Untergrundes bzw. des enthaltenen Wassers wird im Wesentlichen von den Investitionskosten, Betriebskosten und der Lebensdauer der Installation bestimmt.

Alle nachfolgend betrachteten Ausführungsvarianten zur thermischen Nutzung des Untergrundes bzw. von *Strandwasser* werden unter Berücksichtigung der genannten Randbedingungen als Grundlastanlagen simuliert (8.760 jährliche Vollbenutzungsstunden). Um die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Quellenanlagen zu gewährleisten, wurden diese jeweils exemplarisch für eine thermische Leistung von ca. 100 kW ausgelegt.

4.2 Grundlagen zur Oberflächennahen Geothermie und CO₂-Einsparpotential

Der oberflächennahe Untergrund kann aufgrund der ganzjährig relativ gleichmäßigen Temperaturen als Wärmequelle, Kältequelle oder zur saisonalen thermischen Energiespeicherung genutzt werden.

Diese „Erdwärme“ von durchschnittlich $10 - 12\text{ °C}$ der oberflächennahen Schichten wird z.B. mit Hilfe einer „erdgekoppelten“ Wärmepumpe auf für eine Gebäudebeheizung nutzbare Temperaturniveaus angehoben. Als „Erdkälte“ können diese Untergrundtemperaturen häufig ohne zusätzliche Kälteaggregate zur „passiven“ bzw. „freien“ Kühlung direkt genutzt werden. Die über das Jahr relativ konstanten Erdreich- und Grundwassertemperaturen bieten somit optimale Voraussetzungen der Wärme- bzw. Kältengewinnung für die umweltgerechte und wirtschaftliche Temperierung bzw. Klimatisierung von Gebäuden, aber ggf. auch von Freiflächen wie z.B. Bahnsteige, Straßen, Brücken und Handelsverkehrsflächen.

Neben den geologischen/thermophysikalischen Randbedingungen haben projektspezifische Rahmenbedingungen (Wärme-/Kälteversorgungskonzept, Gebäudebestand oder -Neubau, Wärme-/Kälteübertragungssysteme und andere) maßgeblichen Einfluss auf den sinnvollen Einsatz einer geothermischen Nutzung. Bei einer Vielzahl von Bestandsgebäuden ist die Installation einer Geothermieanlage nur mit begleitenden Sanierungsmaßnahmen realisierbar. Deshalb sind insbesondere Neubauvorhaben für die Integration der Geothermie ins Wärme- und Kälteversorgungskonzept prädestiniert.

Aufgrund der geringen Störanfälligkeit und der hohen Lebensdauer werden bei der oberflächennahen Geothermie überwiegend geschlossene geothermische Quellsysteme (u.a. Erdwärmesonden, Energiepfähle, Erdwärmekollektoren, siehe Abb. 13) realisiert. Durch das geschlossene Rohrsystem zirkuliert im Regelfall ein Wasser-Glykol-Gemisch als Wärmeträger, das dem Erdreich die Wärme/Kälte entzieht und einer Wärmepumpe bzw. dem Gebäude direkt zuführt.

Offene geothermische Quellsysteme (u.a. Brunnensysteme, Dubletten und Oberflächenwassernutzungen) sind in der Regel planerisch und in den Unterhaltskosten

aufwendiger, bieten jedoch größere Leistungspotentiale bei sehr hoher Systemeffizienz. Diese Anlagen nutzen das geförderte Wasser direkt thermisch und schlagen es nach Nutzung entweder oberflächlich ab oder reinjizieren es in den Entnahmehorizont des Grundwasserleiters.



Abb. 13: geschlossene geothermische Quellsysteme (von links: Energiepfähle, Erdwärmesonden, Erdwärmekollektor); Quelle: REHAU

Sowohl bei der Nutzung offener als auch geschlossener geothermischer Quellsysteme ist ein vollständiger Verzicht auf fossile Brennstoffe möglich, wenn zur Gewinnung der geothermischen Energie vorrangig regenerativ erzeugter elektrischer Strom genutzt wird. Die Primärenergie (aus natürlichen Quellen zur Verfügung stehende Energie) wird zum großen Teil aus dem Erdreich bzw. Grundwasser gewonnen. Der erforderliche Anteil an Strom zum Betrieb des Wärmepumpenkreislaufs bzw. für Hilfsaggregate (z.B. Umwälzpumpen, Steuerungs- und Monitoring-Systeme) kann ebenfalls regenerativ, beispielsweise mittels Windkraft oder Photovoltaik, zur Verfügung gestellt werden.

Doch selbst bei Verwendung konventioneller (fossiler) Energieträger zur Stromerzeugung (u.a. auch aus KWK-Kraftwerken) haben Geothermieranlagen das Potential einer signifikanten CO₂-Emissions-Einsparung im Vergleich zu anderen Heiz- und Kühlsystemen. Diese ergibt sich vorrangig durch die lediglich anteilige Verwendung von Strom zur Erzeugung von Nutzenergie.

Als maßgebliche Größe für das CO₂-Einsparpotential kann die Jahresarbeitszahl gelten, die das Verhältnis von nutzbarer Heiz-/Kühlenergie zum eingesetzten Strom beziffert. Typische Werte für Geothermieranlagen sind Jahresarbeitszahlen von 4,0...4,5 im Heizbetrieb bzw. 5,0...35,0 im Kühlbetrieb (bei passiver Betriebsweise ohne Wärmepumpenbetrieb ist ausschließlich Hilfsenergie erforderlich).

4.3 Auswahl und Beschreibung der betrachteten geothermischen

Quellensysteme

Zur Ermittlung des thermischen Potentials des unmittelbaren Küsten-/Strandbereiches wurde wie bereits erwähnt (vgl. 4.1) basierend u.a. auf den gewonnenen Messdaten ein dreidimensionales numerisches Modell (*FEM*) des untersuchten Küstenabschnittes vor Warnemünde erstellt.

Innerhalb dieses Modells ist es möglich, verschiedene geothermische Quellensysteme zu simulieren und deren potentielle Leistungsfähigkeit nachzuvollziehen. Die Untersuchung wurde auf etablierte und langjährig erprobte Quellensysteme beschränkt. Sonderbauformen wie thermisch aktivierte Spundwände oder Wellenbrecher erfordern eine individuelle Betrachtung. Nachfolgend werden die betrachteten geothermischen Quellensysteme (hier: thermische Horizontalbrunnen, Erdwärmekollektoren, Spiralwärmetauscher) im Einzelnen kurz beschrieben.

4.3.1 Thermische Horizontalbrunnen

Mit Hilfe moderner Horizontalbohrsysteme können flächig oder linienhaft ausgebildete Grundwasserleiter, u.a. küstennahe Flugsandhorizonte oder Fluss-Terrassensande, für die Gewinnung von Uferfiltrat genutzt werden (Prinzip-Schema siehe Abbildung 14). Ein Pilotvorhaben zur monovalenten Wärmeversorgung des Apartmentwohnhauses „Strandläufer“ in Rostock-Warnemünde wurde im Jahr 2006 mit Erfolg abgeschlossen (Förderrate eines Horizontalstranges ca. 20 m³/h, Einbau des Filterstranges siehe Abbildung 15).

Der Hauptvorteil des Systems Horizontalbrunnen im Bereich unterhalb von Dünen oder Deichen (Grundwasser) ist das im Vergleich zur thermischen Nutzung von Ostseewasser höhere Quellentemperaturniveau im Winter (ca. 7 bis 8 °C) bzw. niedrigere im Sommer (ca. 12 bis 13 °C).

Ein grundsätzlicher Nachteil beim Einsatz von Brunnen zur thermischen Nutzung von Oberflächenwasser ist der im Vergleich zu geschlossenen Systemen erhöhte Wartungsaufwand für mit dem Grund- bzw. Strandwasser in Kontakt stehende Anlagenteile (hier: Förderpumpe, Leitungen, Wärmetauscher).

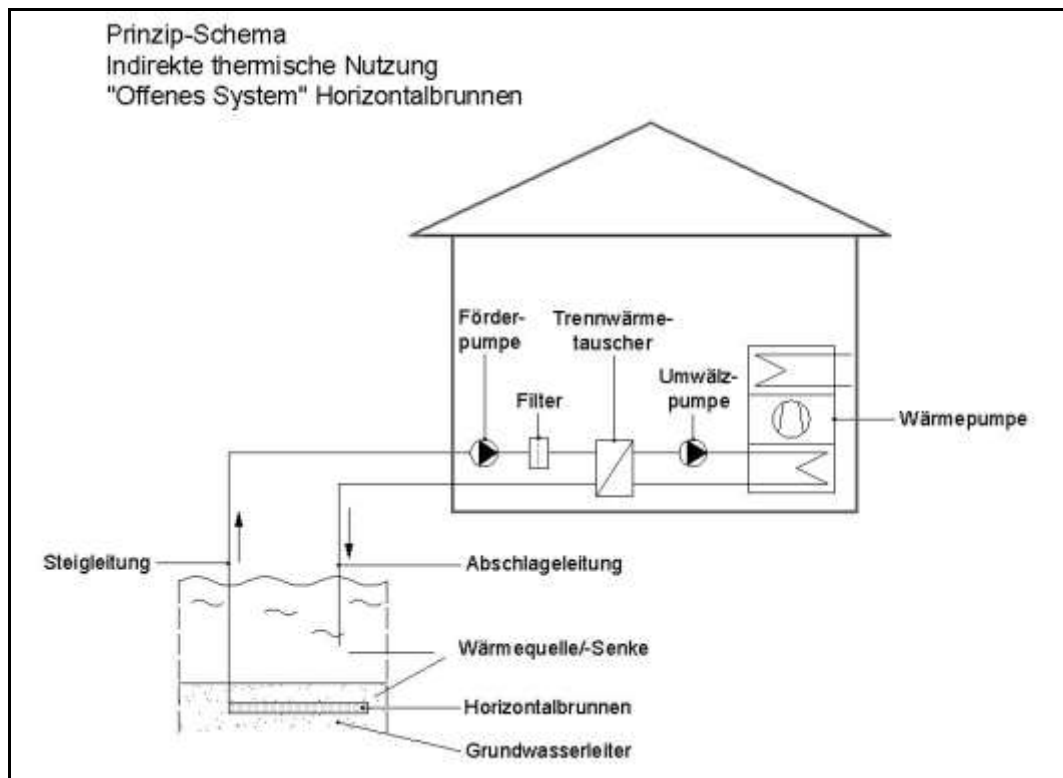


Abb. 14: Prinzip-Schema thermische Nutzung von Oberflächenwasser mittels Horizontalbrunnen

Die Lebensdauer von Horizontalbrunnen wird durchschnittlich mit 15 Jahren angegeben und kann bei guter Pflege und Wartung bzw. angepasster Auswahl der Ausbaumaterialien ggf. verlängert werden. Brunnen unterliegen der Alterung und müssen zur Aufrechterhaltung/Wiederherstellung der Leistung/Funktion je nach Beanspruchung und der spezifischen hydrogeologischen bzw. chemisch/physikalischen Verhältnisse in regelmäßigen Intervallen überprüft und regeneriert/gereinigt werden.

Für einen Leistungsrückgang sind in der Regel physikalische, chemische und biologische Vorgänge im Brunnen verantwortlich, die ein Zuwachsen/Dichtsetzen der Filterrohrschlitze und dem angrenzenden Grundwasserleiter zur Folge haben.



Abb. 15: Einbau des Horizontalfilterstranges mit Detail Bv. *Strandläufer* Rostock-Warnemünde

Die Nutzbarkeit geothermischer Brunnensysteme ist generell stark vom Vorhabensstandort und dessen hydrogeologischen und hydrochemischen Gegebenheiten abhängig. Die wesentlichen Kriterien für Ihre Eignung unterscheiden sich stark von denen für geschlossene Quellensysteme.

Horizontale Brunnen können am oder im Meeresgrund verlegt auch für die thermische Nutzung von Ostseewasser verwendet werden. Durch die deutlich höhere Belastung des Meerwassers mit Schweb- bzw. Nährstoffen, aber auch mit Kleinstlebewesen, besteht grundsätzlich eine größere Gefahr der Bildung von mikrobiellen Belegen („*Biofouling*“), die eine automatische Filtration des Wassers und eine periodische Reinigung der betroffenen Anlagenteile erforderlich machen.

Im Falle der thermischen Nutzung von Meerwasser wird aufgrund der benannten Systemlimitierungen (niedrige Gewässertemperaturen im Winter und Wasserqualität) der Einsatz eines revisionsfähigen Trennwärmetauschers (z.B. zwischen der Wärmepumpe und dem Oberflächenwasserkreislauf empfohlen („indirekte thermische Nutzung“).

4.3.2 Horizontale Erdwärmekollektoren

Erdwärmekollektoren (in der Regel horizontale Flächenkollektoren) sind Wärmeübertrager, die horizontal unterhalb der örtlichen Frostgrenze (Tiefenbereich ca. 1,2...1,5 m) mäanderförmig im Erdreich bzw. im Strandsand verlegt werden (Abb. 16 und Abb. 17).

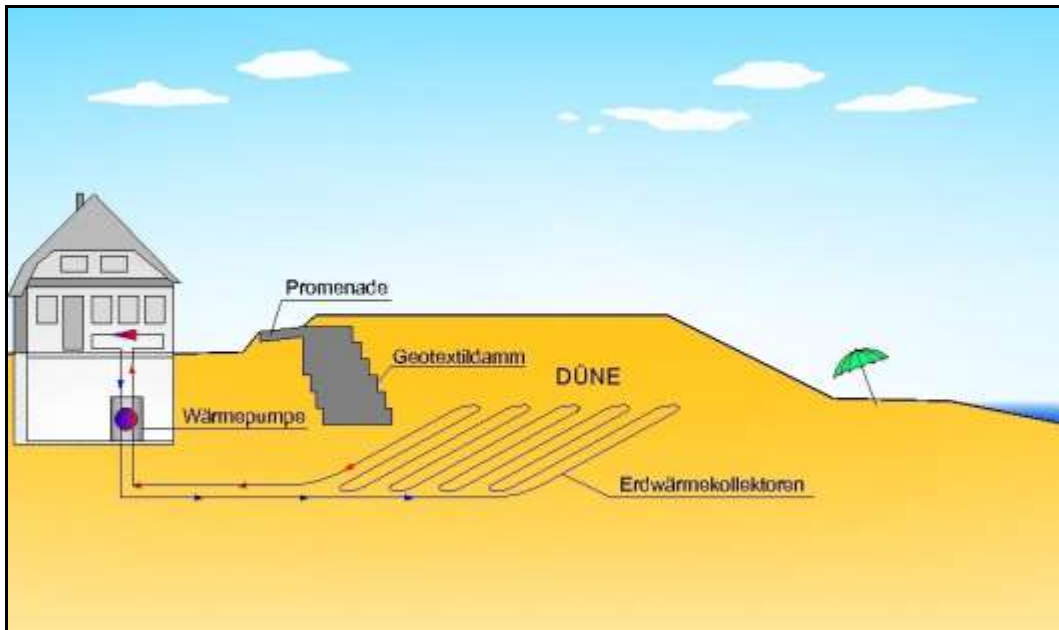


Abb. 16: Prinzip-Schema Erdwärmekollektor unterhalb von Dünen, Quelle: GICON

Im Gegensatz zu den anderen geothermischen Quellsystemen wird bei horizontalen Erdwärmekollektoren nahezu ausschließlich saisonal im Erdreich gespeicherte Umweltwärme genutzt, die maßgeblich durch Sonnenstrahlung, Lufttemperatur und Niederschläge beeinflusst wird. Die erzielbare Entzugsleistung ist abhängig von der Beschaffenheit des Bodens und variiert gemäß VDI-Richtlinie 4640 langfristig zwischen ca. 10 W/m^2 und 40 W/m^2 . Entscheidend ist dabei unter anderem der Grundwasserspiegel auf dem jeweiligen Areal bzw. die Wassersättigung des genutzten Substrates.

Der Hauptvorteil dieses geschlossen Systems ist das hohe Maß an Unabhängigkeit von der Wasserqualität und Quelltemperatur bei gleichzeitig moderaten Investitions- und Wartungskosten. Darüber hinaus wird für das Material der Quellenanlage (üblich: PE-HD, PE-RC, PE-XA) eine hohe Lebensdauer >70 Jahren prognostiziert.

Weitere Vorteile durch die Verwendung von Erdwärmekollektoren bestehen unter anderem in ihrer relativ einfachen und kostengünstigen Installation, die u.a. durch entsprechend geschulte Sanitär- und Heizungsbaubetriebe durchgeführt werden kann. Von geschlossenen Wärmetauschern geht keine wesentliche hydraulische Beeinflussung des Grund- bzw. Strandwassers aus.



Abb. 17: Verlegung eines horizontalen Erdwärmekollektors am *Darßer Bodden* (M-V)

Nachteilig bei Erdwärmekollektoren ist im Allgemeinen einerseits der relativ große Flächenbedarf, andererseits bei oberflächennaher Verlegung aber auch die fehlende Möglichkeit einer leistungsfähigen Kühlung. Die Nutzung als saisonaler thermischer Wechselspeicher (Heizen und Kühlen) kann im küstennahen Bereich durch eine entsprechende Einbautiefe sichergestellt werden. Für einen ausschließlichen Heizbetrieb wäre eine oberflächennahe Verlegung von Vorteil, da durch die Nähe des Wärmeübertragers zur Erdoberfläche eine vollständige jährliche thermische Regeneration des genutzten Bodenkörpers erreicht wird.

Aufgrund ihres vergleichsweise geringen thermischen Einflussbereiches können Erdwärmekollektoren verschiedener Betreiber mit wenigen Metern Abstand zueinander errichtet werden.

Typisch ist eine geothermische Nutzung des Untergrundes mittels Erdwärmekollektoren bei Einfamilienhäusern im ländlichen Bereich und untergeordnet auch bei mittelgroßen Bauvorhaben anzutreffen.

4.3.3 Vertikale Spiralkollektoren

Spiralkollektoren sind eine Sonderbauform der Erdwärmekollektoren und gehören ebenfalls zu den geschlossenen Systemen (solegefülltes Wärmetauschersystem, Abb. 18). Die Installation im Untergrund ist sowohl horizontal wie auch vertikal möglich. Im Regelfall werden Spiralkollektoren in bis zu ca. 4,5 m unter Geländeoberkante reichende vertikale Bohrlöcher (Durchmesser ca. 0,4 bis 0,5 m, Abb. 19) eingebaut. Am Strand oder im Bereich der Dünen ist während des Bohrvorganges und nachfolgenden Einbaues eine temporäre äußere Schutzverrohrung einzusetzen.

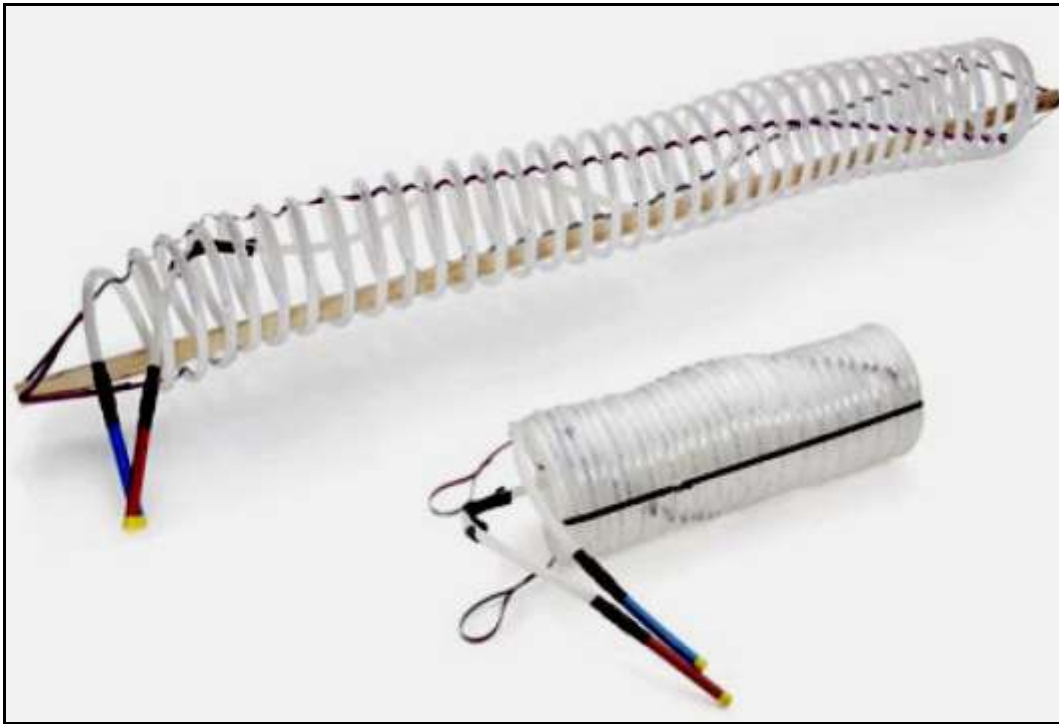


Abb. 18: Spiralwärmetauscher Typ *Helix*, Quelle: *REHAU*

Wie bei den horizontalen Erdwärmekollektoren nutzen Spiralkollektoren nahezu ausschließlich saisonal im Erdreich gespeicherte Umweltwärme und werden dadurch maßgeblich durch Sonnenstrahlung, Lufttemperatur und Niederschläge beeinflusst. Die erzielbare Entzugsleistung ist abhängig von der Beschaffenheit des Bodens (Substrat, Wassergehalt) und variiert gemäß Herstellerangabe zwischen ca. 100 und 700 Watt je Wärmetauscher. Besonders leistungsfähig sind Spiralkollektoren wenn sie mit Grundwasser durchströmt werden. Durch den vertikalen Einbau kann im Vergleich zu den horizontalen Erdwärmekollektoren eine erheblich größere spezifische Leistung bezogen auf die Fläche erzielt werden.

Durch die tiefer im Untergrund liegenden Teile des Wärmetauschers ist die thermische Regenerationsfähigkeit bei stagnierendem Grundwasser nur eingeschränkt möglich weshalb der Betrieb als saisonaler thermischer Wechselspeicher empfohlen wird.



Abb. 19: Einbau eines Spiralkollektors in das Bohrloch, Quelle: REHAU

4.4 Numerisches 3D-Modell

4.4.1 Modell-Eingangsdaten und Diskretisierung

Für eine Generalisierung der geologischen Modellvorstellung wurden die Profile der vorliegenden Erkundungsbohrungen und die Schichtenprofile bzw. Schichtenverzeichnisse des Bohrdatenarchivs des geologischen Dienstes M-V (*LUNG*) zu Grunde gelegt (vgl. Zwischenberichte 1 und 2 [1, 2]).

Der Aufbau des numerischen Grundwassermodells erfolgte gemäß Tab. 1 bzw. Anlage 1. Im Vertikalen erfolgte eine Diskretisierung des Modells durch insgesamt 14 Slices und 13 Layer.

Der obere Modellabschluss (Slice 1, Geländeoberfläche) wurde auf Grundlage von SRTM-Höhendaten sowie Höhenangaben aus der *DTK 10* und eigenen Vermessungsergebnissen digitalisiert. Der Meeresgrund ist entsprechend der durchgeführten Vermessungen [5] und Seekarten nachgebildet worden.

Der obere unabgedeckte Grundwasserleiter aus Strand- und Wallsanden wird durch die Modellebenen (Slices) Nr. 1 und Nr. 8 begrenzt. Aus ihm wird über simulierte Wärmeübertrager Wärme entzogen oder zugeführt. Der wasserungesättigte Dünenkomplex zwischen der Seepromenade und dem Strand ist im Modell berücksichtigt (Programmkonfiguration: *unsaturated type*). Slices Nr. 9 bis Nr. 12 stellen im numerischen Modell einen Grundwassergeringleiter aus Geschiebemergel dar. Slices Nr. 13 bis Nr. 14 bilden die Feinsande des 1. abgedeckten Grundwasserleiters ab.

Tab. 4: Hydrogeologische und thermophysikalische Eingangsdaten der numerischen Simulation (vgl. Anlage 2)

Slice	Schicht	Hinweise	Mächtigkeit [m]	Niveau [m NHN]	kh [m/s]	kv [m/s]	nutzbare Porosität [-]	Gesamt Porosität [-]	Wärmekapazität [J/m³ x K]	λ Fluid [W/m x K]	λ Solid [W/m x K]	λ eff [W/m x K]
1	Fein- bis Mittelsand	Geländeoberfläche		SRTM, (0,0 bis +5,0)	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0
2				SRTM - 0,1	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0
3				SRTM - 0,2	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0
4				SRTM - 0,3	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0
5		OK Spiralkollektor Verlegeebene	5	0,0	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0
6		Horizontalbrunnen		-1,0	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0
7				-2,0	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0
8		UK Spiralkollektor Verlegeebene		-3,0	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0
9	Geschiebemergel (fs, ms)	Buffer		-4,0	1,00E-07	5,00E-08	0,05	0,30	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,0	1,6
10			5	-5,0	1,00E-07	5,00E-08	0,05	0,30	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,0	1,6
11				-8,0	1,00E-07	5,00E-08	0,05	0,30	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,0	1,6
12		Buffer		-9,0	1,00E-07	5,00E-08	0,05	0,30	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,0	1,6
13	Feinsand (ms, u)	Buffer		-10,0	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0
14		Modelluntergrenze		-24,0	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0

Die geologischen und hydrogeologischen Eingangsparameter (Schichtenfolgen, k_h -Wertebereiche) des generalisierten Schichtenmodells sind im folgenden 3D-Blockbild (Abb. 20) veranschaulicht.

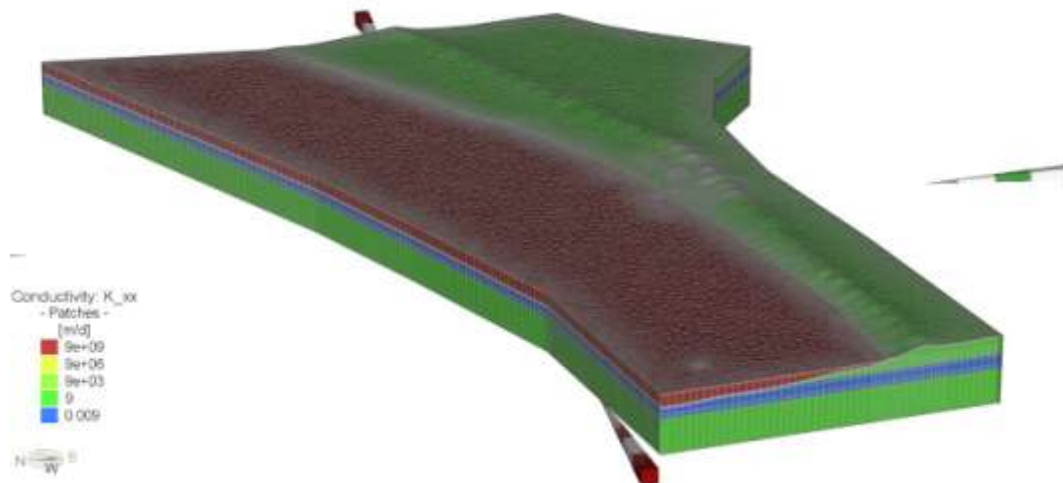


Abb. 20: 3D-Blockbild des numerischen Küstenmodells (z-Werte 5-fach überhöht dargestellt) grün = Grundwasserleiter, blau= Grundwassergeringleiter (Werte gemäß Tab. 4)

Abbildung 21 zeigt die Diskretisierung des Finite-Elemente-Netzes im Modellgebiet. Die Modelldiskretisierung nimmt in Richtung der simulierten Wärmeübertrager und an der Küstenlinie sukzessive zu, um die Genauigkeit bzw. Abbildungsschärfe der Modellergebnisse im Aussagegebiet zu erhöhen. Die Größe des Modellgebietes beträgt ca. 2 km².

Die Lage der simulierten Wärmeübertrager sowie die Modelldiskretisierung sind in Abbildung 22 dargestellt. Die ausgewählten Wärmeübertrager (Horizontalbrunnen, Erdwärmekollektoren, Spiralkollektoren) wurden nacheinander in drei unterschiedliche Einbausituationen simuliert:

- Düne (ca. 4,5 bis 5,0 m unter GOK),
- Strand (ca. 1,5 bis 2,0 m unter GOK),
- Wasser (ca. 0,5 bis 1,5 m unter Wasser, Meeresgrund).

Auf eine Simulation von vertikalen Spiralkollektoren im Bereich der Ostsee wurde verzichtet, da der Einbau in den Meeresgrund sehr aufwendig wäre und darüber hinaus durch die

erforderliche Bohrung die Gefahr der Schaffung einer hydraulischen Verbindung zwischen Ostsee und dem 1. abgedeckten Grundwasserleiter besteht.

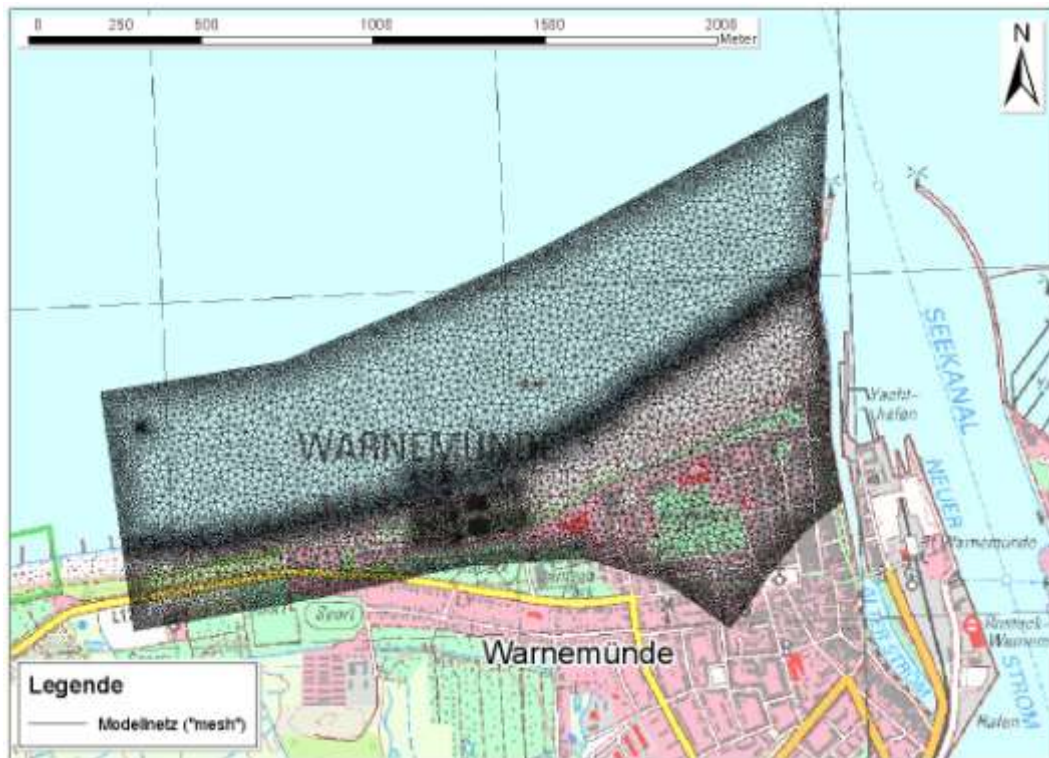


Abb. 21: Modelldiskretisierung (Finite Elemente Netz) im Modellgebiet, Hintergrund: DTK 10

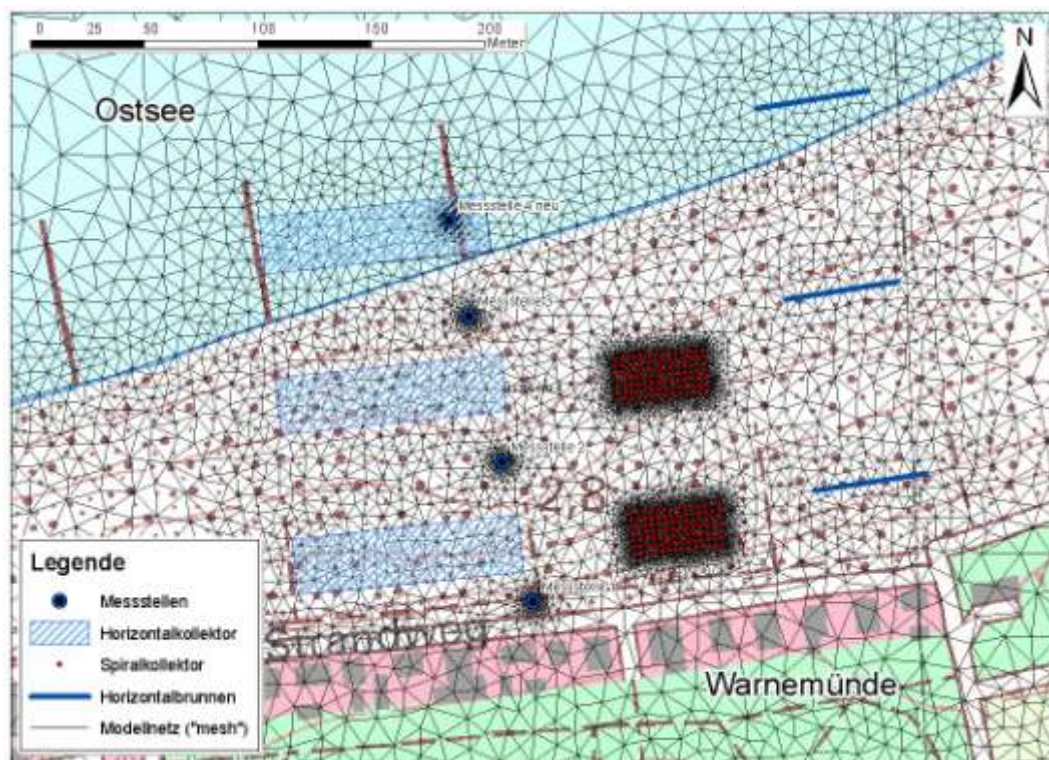


Abb. 22: Lage der Wärmeübertrager und Diskretisierung, Hintergrund: Luftbild GAIA M-V

4.4.2 Thermische und hydraulische Randbedingungen

Auf Basis der im Rahmen des RADOST-Anwendungsprojektes gewonnenen Messdaten (hier: Grund- und Meerwasserspiegel, Temperaturen) und den vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellten Lufttemperaturen am Standort Warnemünde wurde das numerische 3D-Modell konfiguriert und anhand von Testläufen plausibilisiert und anschließend kalibriert.

Folgende Arbeitsschritte wurden zur Erstellung eines numerischen Ausgangsmodells nacheinander durchgeführt:

- Simulationszeitraum vom 01.05.2011 bis 31.03.2013 (699 Tage),
Thermische Randbedingung auf Slice 1:
 Monatliche Mittelwerte der Lufttemperatur des betrachteten Zeitraums
 (DWD Station Warnemünde, Zeitreihe 2011-2013),
Hydraulische Randbedingung Modellberandung (Abb. 25):
 Wasserspiegelmessungen IMK Warnemünde und Mst. 1 (2 h-Intervalle),
 Modelleinstellung: *unsaturated, transient flow and transport*,
 ⇒ *hydraulische und thermische Kalibrierung*.
- Simulationszeitraum vom 01.05. Jahr 1 bis 31.04. Jahr 2 (730 Tage)
Thermische Randbedingung auf Slice 1:
 Monatliche Mittelwerte der Lufttemperatur für den betrachteten Zeitraum,
 (DWD Station Warnemünde, Zeitreihe 1961-1990, Abb. 23),
Hydraulische Randbedingung Modellberandung:
 langjährige Mittelwerte: 0 m HN (Ostsee) und +0,6 m HN (Grundwasser),
 Modelleinstellung: *unsaturated, transient flow and transport*,
 ⇒ *Ausgangsmodell*.

Die unterschiedlichen Wärmeübertrager wurden als thermische und ggf. hydraulische Randbedingung (*RB*) im Modell implementiert:

- Horizontalbrunnen (50 m Filterstrecke, DN 180): *well RB*, discrete feature element,
- Horizontale Erdwärmekollektoren (2.500 m²): *heat flux RB*,
- Vertikale Spiralkollektoren (98 Stück, ca. 700 m²): *borehole heat exchanger RB* (Abb. 24).

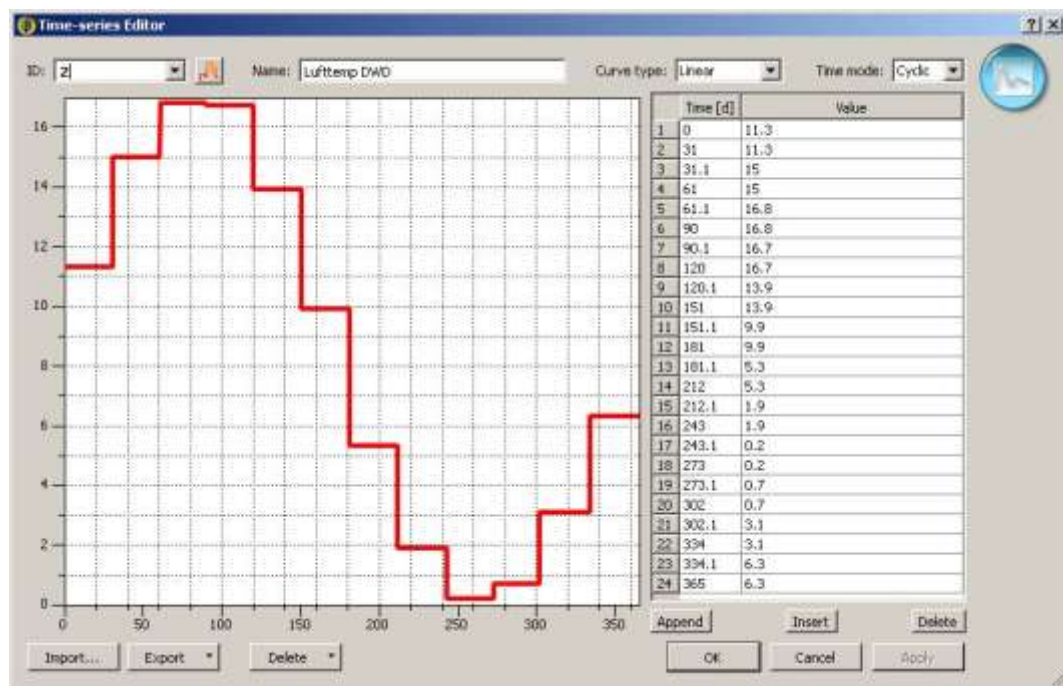


Abb. 23: Thermische Randbedingung Slice 1 Ausgangsmodell, mittlere monatliche Lufttemperaturen, Start der Simulation: 01. Mai (11,3 °C)

Die monatliche mittlere Entzugs- bzw. Injektionsarbeit für den jeweiligen Wärmeübertrager wurde als zeitabhängiger Parameter („*time-varying function ID*“) konfiguriert.

Gemäß der erwarteten monatlichen Verteilung des Jahreswärme- und Kühlbedarfs wurde die berechnete thermische Arbeit in MJ/d als Monatsmittelwerte für die jeweilige Geothermieanlage im Grundlastbetrieb ermittelt (Beispiel siehe Tab. 5).

Tab. 2: Ermittelte thermische Entzugs- und Injektionsarbeit (MJ/d), Jahresanforderungsprofil (hier für Spiralkollektoren unterhalb einer Düne)

Monat	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Entzugs-/Injektionsarbeit [MJ/d]	-1920	-1986	-1125	-581	1161	1920	2359	2280	1161	-600	-929	-1626

Bei der geohydraulischen Modellierung (instationär) werden wie bereits erwähnt als hydraulische Randbedingungen Potentiallinien verwendet. Durch die Kennzeichnung der Berandungen wird ein Strömungsfeldausschnitt definiert. Die Grundwasserströmung in den Grundwasserleitern stellt sich im Modell entsprechend des Strömungsgradienten und der implementierten kf-Werte ein. Die longitudinale und transversale Dispersivität wurde mit 5,0 bzw. 0,5 m definiert (Standardwert *FEFLOW*) und kann auf Anforderung im Zuge von in-situ Tracerversuchen angepasst werden.

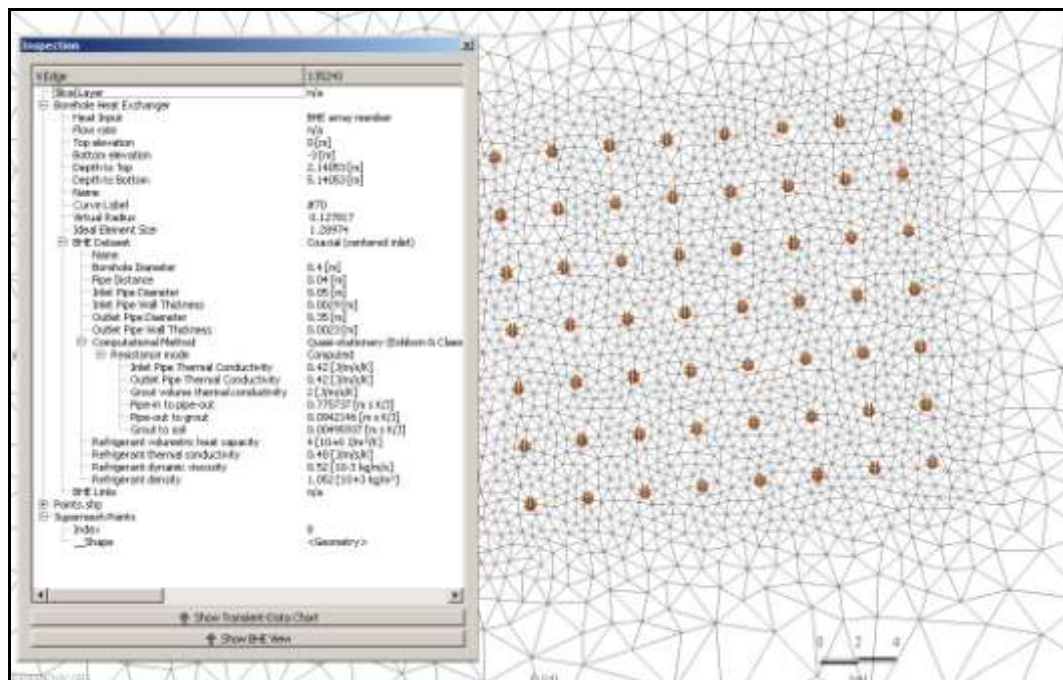


Abb. 24: Simulations-Konfiguration thermische Randbedingung „bhe“ für Spiralkollektoren

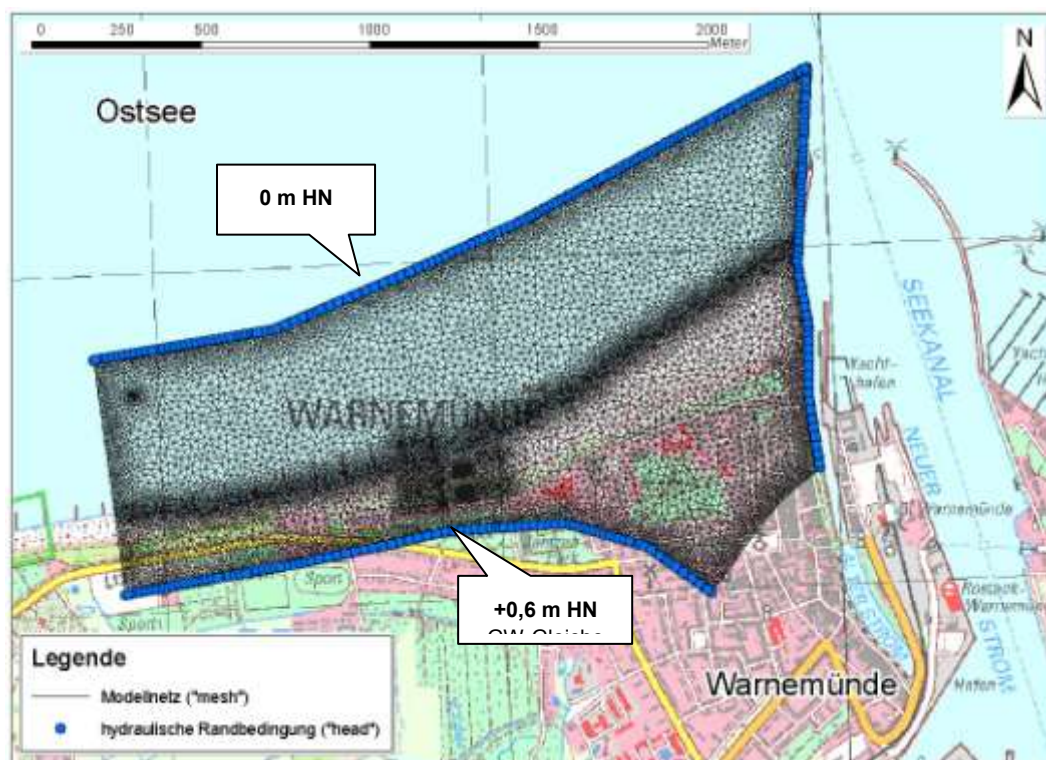


Abb. 25: Hydraulische Randbedingung „constant head“ im Ausgangsmodell

4.4.3 Modellkalibrierung

Um das erstellte numerische Modell zu plausibilisieren und ggf. zu kalibrieren, wurden die in situ gemessenen Parameter (hier: Grund- und Meerwasserspiegel, Temperaturen) mit den Ergebnissen der Simulationsläufe verglichen. Dazu wurden die realen Messstandorte (Mst. 1 bis Mst. 4 zzgl. *IMK Warnemünde*) im Modell als virtuelle Beobachtungspunkte

implementiert und die berechneten hydraulischen Druckhöhen und Temperaturen aufgezeichnet.

Eine Kalibrierung des Modells bezüglich der Grundwasserhydraulik war erforderlich, um in der Simulation ein stimmiges Grundwasser-Strömungsbild erzeugen zu können.

Das Grundwassermodell wurde nach einer Sensitivitätsuntersuchung der maßgeblichen Modellparameter über die hydraulische Randbedingung im Grundwasserzustrom (südliche Modellberandung) kalibriert. Die an Mst. 1 in situ gemessenen Werte wurden jeweils um 0,2 m erhöht und als instationäre Randbedingung am südlichen Modellrand definiert. Der Vergleich des simulierten Grundwasserspiegels mit den gemessenen Daten zeigt insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung (Abb. 26 bis 29).

Für das Ausgangsmodell wurde der Mittelwert der Druckhöhe des Grundwasserzustroms verwendet (+ 0,6 m HN). Die in situ gemessenen hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte (k_{fh}) für den oberen Grundwasserleiter wurden im Rahmen der Modellkalibrierung nicht geändert.

Um das numerische Modell thermisch zu kalibrieren, wurden die sich gemäß Simulation einstellenden Untergrund- bzw. Wassertemperaturen mit den in-situ gemessenen Temperaturverläufen der Messstellen abgeglichen.

Im Ergebnis des Vergleiches wurde eine sehr gute Übereinstimmung der Temperaturverläufe festgestellt, sodass keine weiteren Modellanpassungen erforderlich wurden (Abb. 30 bis 33).

Das hydraulisch kalibrierte Modell ist damit plausibel und bildet die regionalen thermohydrodynamischen Prozesse im untersuchten Küstenabschnitt grundsätzlich gut ab.



Abb. 26: Vergleich des simulierten (grau) mit dem gemessenen Wasserspiegel (blau), Mst. 1



Abb. 27: Vergleich des simulierten (grau) mit dem gemessenen Wasserspiegel (blau), Mst. 2

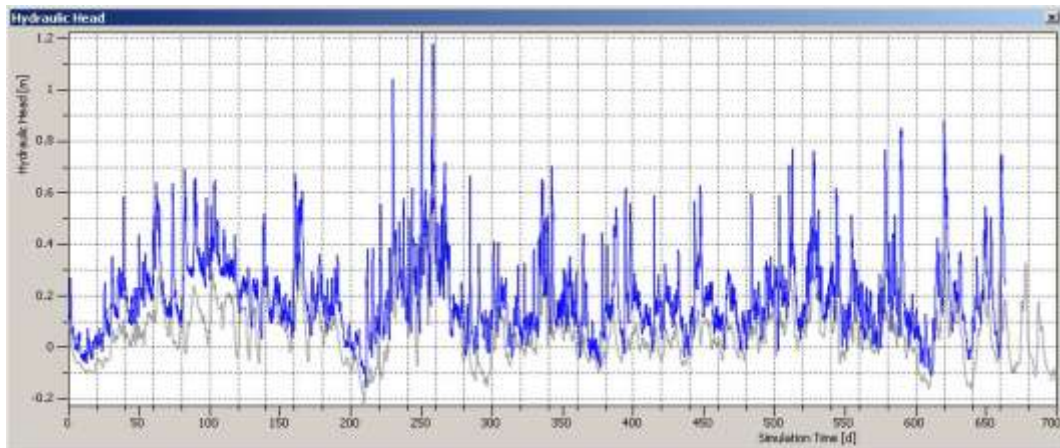


Abb. 28: Vergleich des simulierten (grau) mit dem gemessenen Wasserspiegel (blau), Mst. 3

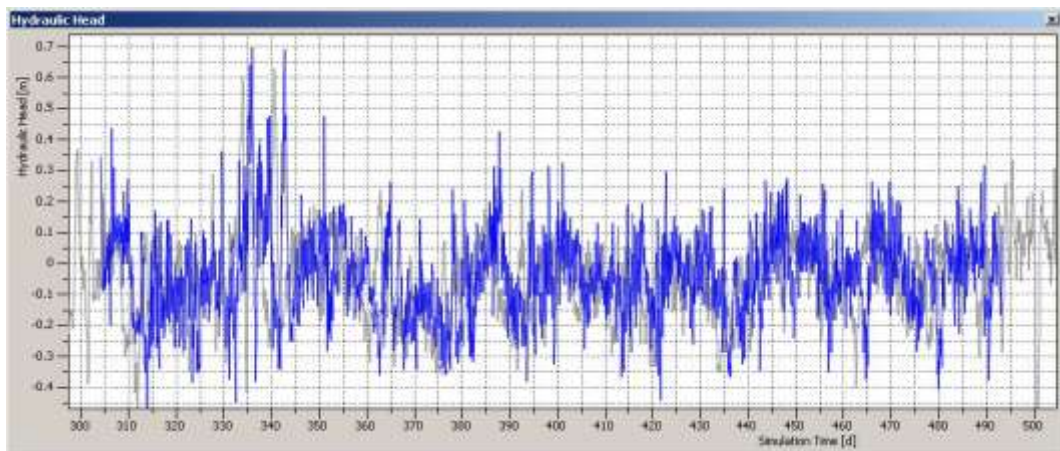


Abb. 29: Vergleich des simulierten (grau) mit dem gemessenen Wasserspiegel (blau), Mst. 4

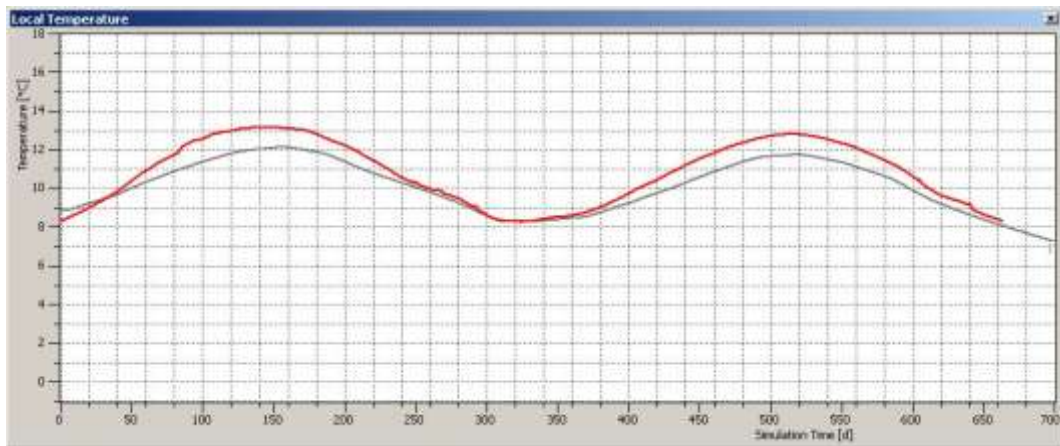


Abb. 30: Vergleich des simulierten (grau) mit dem gemessenen Temperaturen (rot), Mst. 1

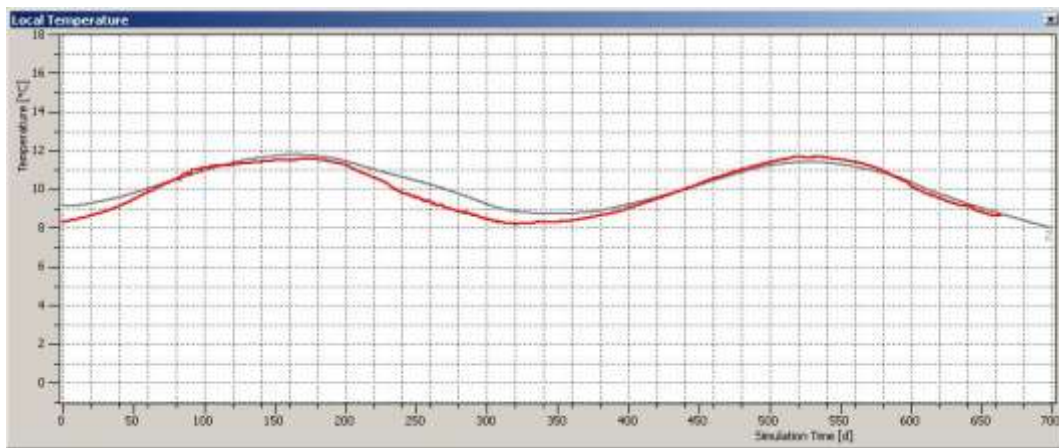


Abb. 31: Vergleich des simulierten (grau) mit dem gemessenen Temperaturen (rot), Mst. 2



Abb. 32: Vergleich des simulierten (grau) mit dem gemessenen Temperaturen (rot), Mst. 3

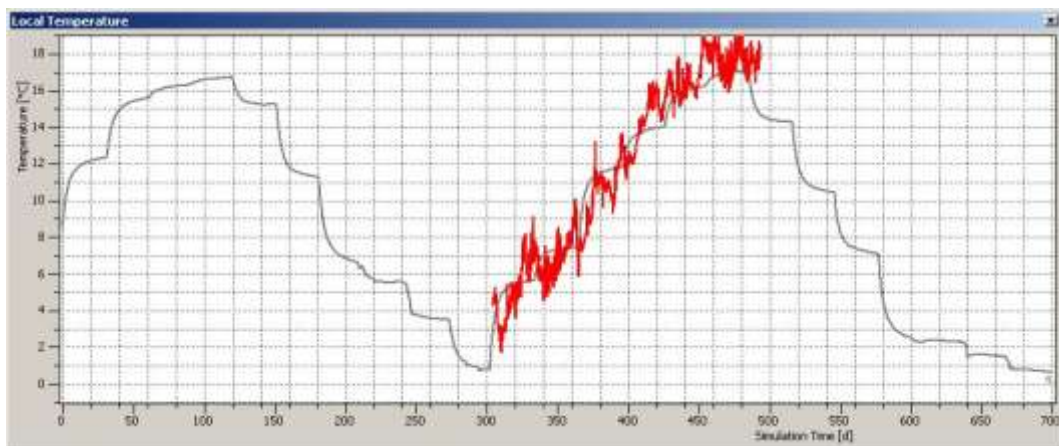


Abb. 33: Vergleich des simulierten (grau) mit dem gemessenen Temperaturen (rot), Mst. 4

4.5 Ergebnisse der thermohydrodynamischen Simulationen

Die nachfolgenden Darstellungen und Interpretationen der Simulationsergebnisse beziehen sich hauptsächlich auf die betrachteten Erdwärmetauscher (Horizontalbrunnen, horizontale Erdwärmekollektoren, Spiralkollektoren) und den thermisch beeinflussten Tiefenbereich des oberen Grundwasserleiters. Wie bereits erwähnt, wurde jeweils der Grundlastbetrieb mit einem auf ca. 100 kW Entzugsleistung ausgelegten Wärmeübertrager im Modell nachgebildet. Es wurden jeweils zwei unterschiedliche Betriebsszenarien simuliert:

- ausschließlicher Heizbetrieb (Oktober bis April, 214 Tage pro Jahr),

- Heizen und Kühlen (saisonal ausgeglichen).

Die Simulationslaufzeit wurde nach vorhergehenden Testläufen auf zwei Jahre beschränkt (01.05. 1. Jahr bis 31.04. 2. Jahr). Das für alle Simulationen genutzte Ausgangsmodell wurde zuvor ohne Wärmetauscher thermisch auf den Startzeitpunkt eingestellt (tiefendiskrete Temperaturverteilung, siehe Abb. 34).

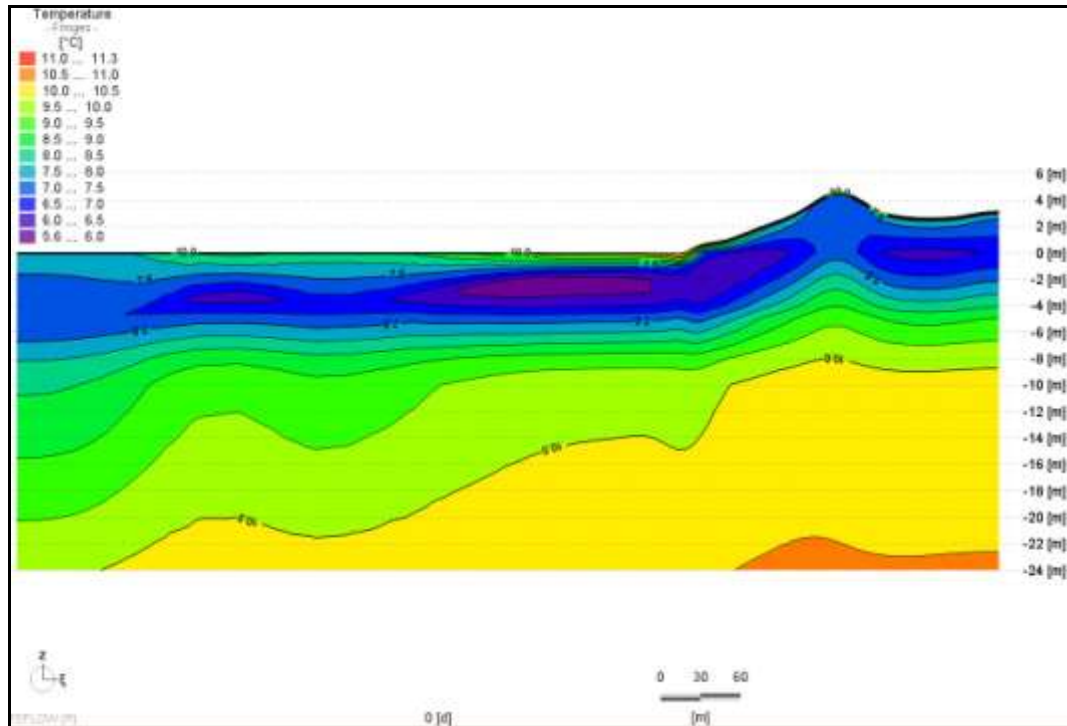


Abb. 34: Temperaturverteilung Ausgangsmodell (thermisch eingeschwungen, 1. Mai)

Die lokale Grundwasserbewegung im obersten unabgedeckten Grundwasserleiter, den Strandwallsanden, sollte entsprechend der definierten Modellrandbedingungen nach Nordnordwest gerichtet verlaufen. Die Entwässerung erfolgt in die überregionale Vorflut der Ostsee. Diese Annahme wird durch die Simulationsergebnisse bestätigt (Abb. 35).

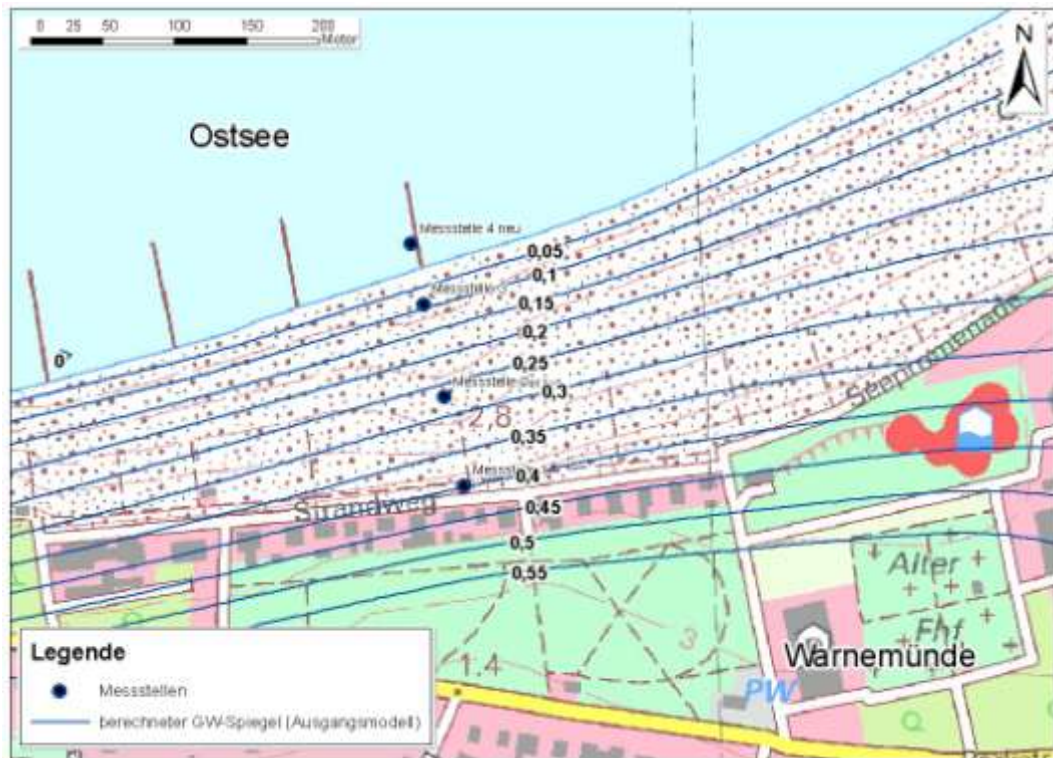


Abb. 35: Berechnete Grundwasserspiegel für den oberen Grundwasserleiter, Ausgangsmodell

Die mit der numerischen Simulation für den Bereich des Strandes und der Düne prognostizierte mittlere Grundwasserfließgeschwindigkeit im regionalen Grundwasserleiter als Funktion des Durchlässigkeitsbeiwertes und hydraulischen Gradienten beträgt ca. 15 m/a. Abbildung 36 zeigt die berechnete Wassersättigung im Bereich der Düne.

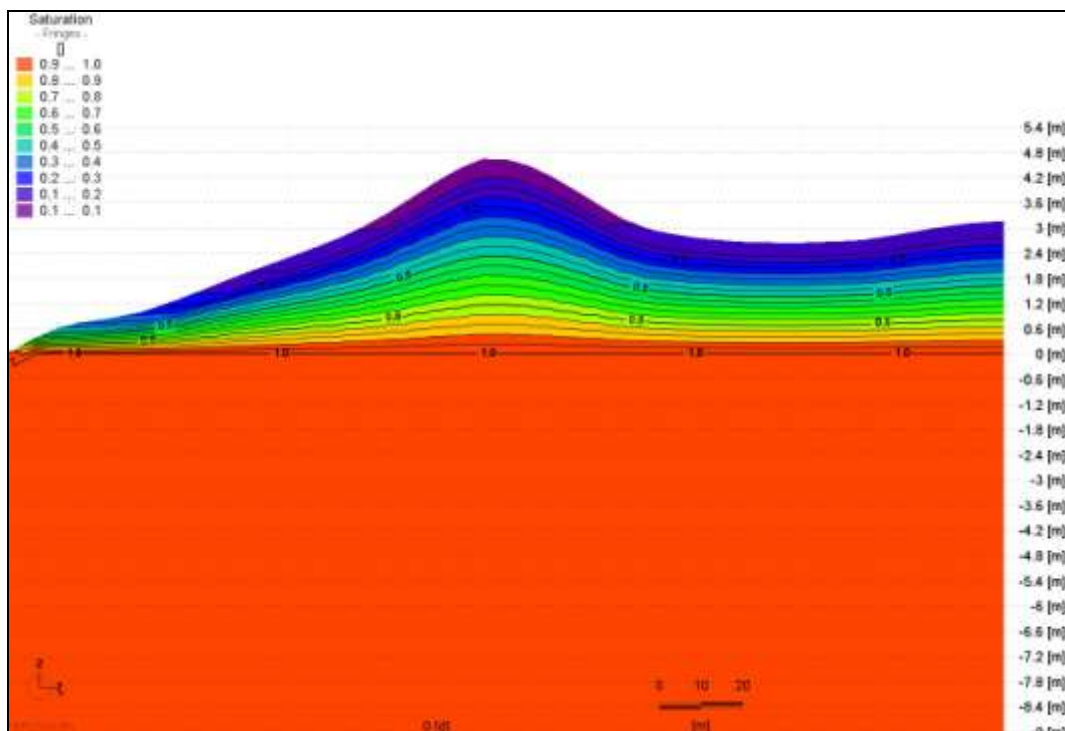


Abb. 36: Wassersättigung Ausgangsmodell (1,0 = 100 % wassergefüllte Porenräume)

Die für die Prognose des geothermischen Potentials relevanten mittleren Fluidtemperaturen innerhalb des jeweiligen Wärmeübertragers werden durch eine automatische

Datenaufzeichnung im gekoppelten numerischen Grundwasser- und Wärmeströmungsmodell erfasst und als Zeit-Temperatur-Plot visualisiert.

Zum Ende des simulierten 2-jährigen Betriebsjahres erfolgt jeweils eine Darstellung der prognostizierten Untergrundtemperaturen im Grund- und Aufriss des betrachteten Wärmeübertragers.

Die graphische Ergebnisdarstellung der thermohydrodynamischen Simulationen erfolgt aufgrund des Umfanges in der **Anlage 3**. Exemplarisch werden in Abbildung 37 bis 40 die Ergebnisse für einen horizontalen Erdwärmekollektor im Strandbereich dargestellt.

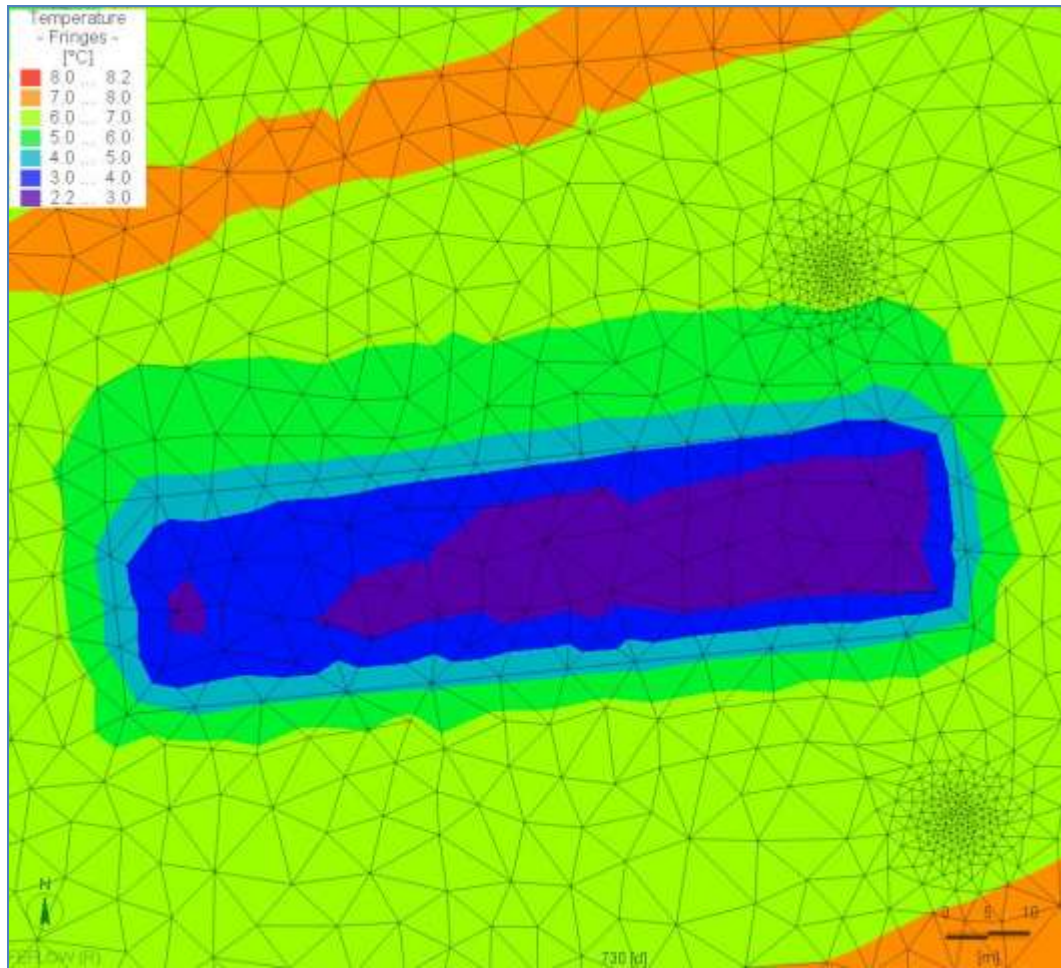


Abb. 37: Horizontaler Erdwärmekollektor im Strandbereich, Prognostizierte Temperaturen Ende April (Heizfall), Verlegeebene ca. 1,5...2,0 m u. GOK

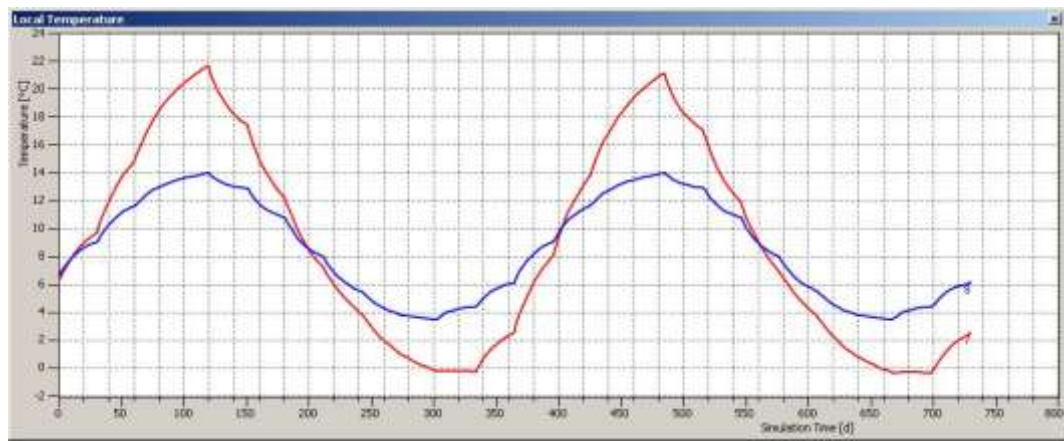


Abb. 38: Y-Achse = prognostizierte mittlere Fluidtemperaturen (rot) und ungestörte Untergrundtemperatur (blau); X-Achse = Simulationszeit in Tagen, **Heiz- und Kühlbetrieb**

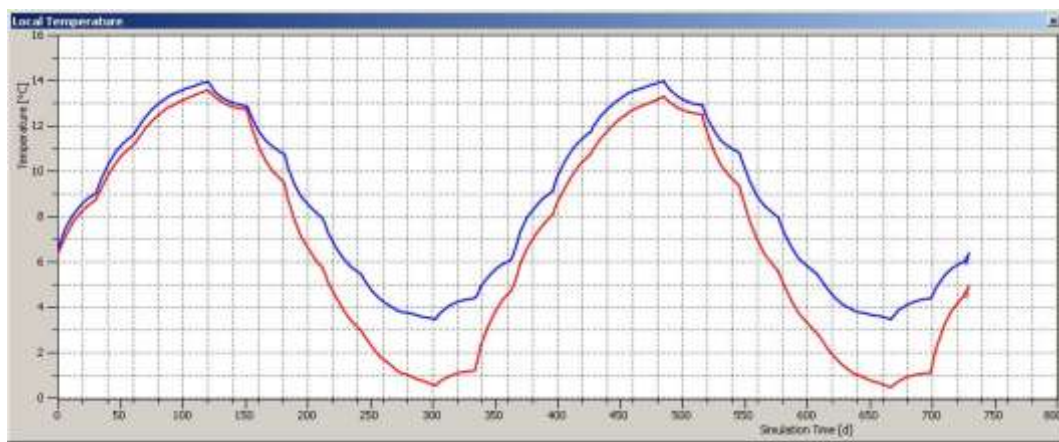


Abb. 39: Y-Achse = prognostizierte mittlere Fluidtemperaturen (rot) und ungestörte Untergrundtemperatur (blau); X-Achse = Simulationszeit in Tagen, **ausschließlicher Heizbetrieb**

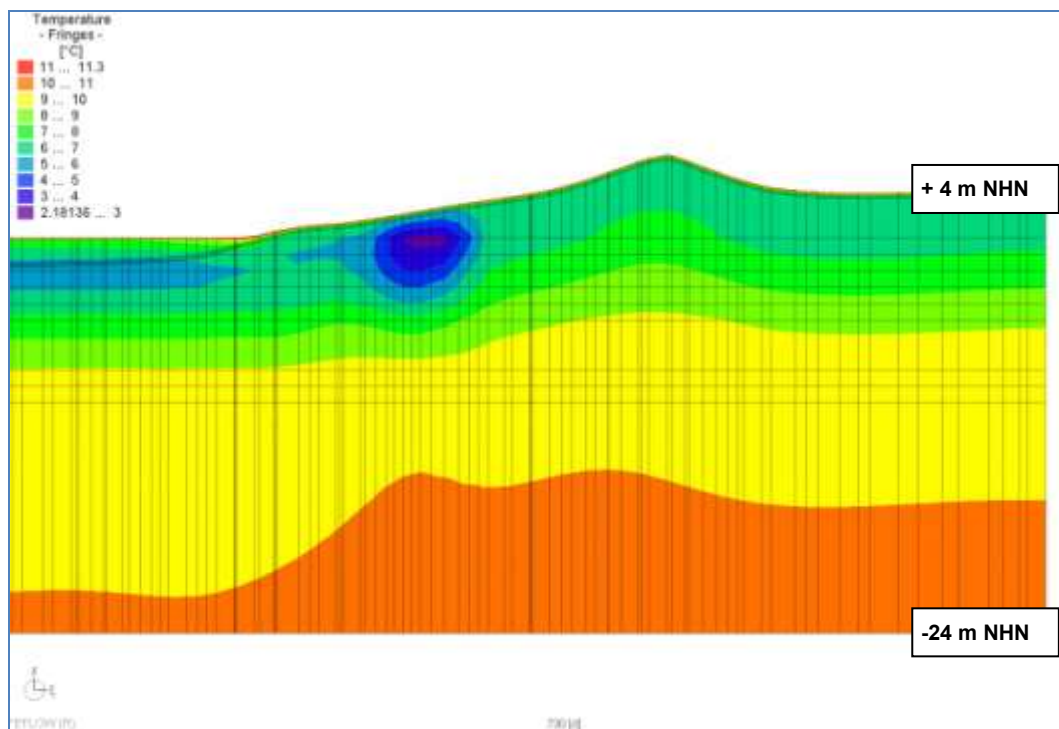


Abb. 40: Horizontaler Erdwärmekollektor im Strandbereich, prognostizierte Temperaturverteilung Ende April (Heizfall), Profilschnitt S-N

Tabelle 6: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse (hier: iterativ ermittelter prognostizierter Energieertrag) für die betrachteten Küstenabschnitte, siehe auch Anlage 4

Standort	geothermische Quellenanlage [exemplarisch, ca. 100 kW Entzugs- bzw. Injektionsleistung]	Prognose Jahresertrag thermische Energie [MWh, erdseitig]	
		Heiz- und Kühlbe- trieb	nur Heizbe- trieb
Düne	Erdwärmekollektor	316	110
	vertikale Spiralsonden	148	46
	Horizontalbrunnen	464*	348*
Strand	Erdwärmekollektor	240	92
	vertikale Spiralsonden	124	50
	Horizontalbrunnen	348**	261**
Wasser	Erdwärmekollektor	316	92
	vertikale Spiralsonden	n.m.	n.m.
	Horizontalbrunnen	174***	87***

* angesetzte jährliche Vollbenutzungsstunden: Heizbetrieb 3.000 h; Kühlbetrieb 1.000 h
(rechnerisch berücksichtigte thermische Leistung: 116 kW)

** angesetzte jährliche Vollbenutzungsstunden: Heizbetrieb 3.000 h; Kühlbetrieb 1.000 h
(reduziertes Leistungsvermögen durch Temperaturlimits, rechnerisch berücksichtigte thermische Leistung: 87 kW)

*** angesetzte jährliche Vollbenutzungsstunden: Heizbetrieb 1.500 h; Kühlbetrieb 1.000 h
(reduziertes Leistungsvermögen durch Temperaturlimits: Heizbetrieb 58 kW; Kühlbetrieb 87 kW)

Einzelbetrachtung:

Düne:

Im Bereich unterhalb der Düne bilden die wassergesättigten Sande ein optimales Betriebsumfeld für die thermische Nutzung. Durch die mehrere Meter mächtige Überdeckung werden saisonale bedingte Temperaturschwankungen nur abgeschwächt übertragen wodurch ein frühzeitiges Erreichen technisch bedingter thermischer Limits vermieden wird. Für den kombinierten Heiz- und Kühlbetrieb sind somit optimale Voraussetzungen gegeben. Die rechnerisch ermittelte spezifische Leistung von ca. 35...40 W/m² für einen horizontalen Erdwärmekollektor entspricht dem oberen Erwartungswert der VDI-Richtlinie 4640.

Der ausschließliche Heizbetrieb mittels geschlossener Wärmeübertrager ist mit deutlichen Ertragseinbußen verbunden (Reduzierung des prognostizierten Energieertrages auf ca. 30 %), da eine klimatisch bedingte thermische Regeneration im Sommer nur eingeschränkt möglich ist.

Im Vergleich mit den anderen betrachteten Küstenabschnitten werden unterhalb der Düne im wechselseitigen Heiz- und Kühlbetrieb für alle simulierten geothermischen Quellsystemen größtmögliche jährliche Energieerträge prognostiziert.

Strand:

Für die betrachteten geschlossenen geothermischen Quellensysteme (hier: Erdwärme- und Spiralkollektoren) werden ca. 1,5 bis 2,0 m unterhalb der Strandoberfläche gemäß der Simulationsergebnisse ebenfalls gute bis sehr gute thermische und hydrologische Bedingungen erwartet.

Im Vergleich zu den unterhalb der Düne gelegenen Bodenschichten übertragen sich saisonale Temperaturschwankungen im oberflächennahen Strandbereich stärker auf die verlegten Wärmeübertrager. Dies führt einerseits zu einer Reduzierung der nutzbaren Temperaturspanne im Heiz- und Kühlbetrieb und damit zu einer Verringerung der möglichen jährlichen Energieerträge und andererseits zu einer beschleunigten thermischen Regeneration bei einem ausschließlichen Wärmeentzug (Heizbetrieb).

Die prognostizierten spezifischen Energieerträge liegen insgesamt auf einem hohen Niveau (z.B. Erdwärmekollektor: spezifische Jahresarbeit im Heiz- und Kühlbetrieb ca. 90...100 kWh/m²).

Durch den Betrieb eines horizontalen Brunnens mit einer Verlegetiefe des Filters von ca. 4,5...5,0 m unter GOK kann eine vergleichsweise große Energiemenge gewonnen werden (ca. 580 MWh/a). Das dem Brunnen zuströmende Wasser kommt gemäß der Simulationsergebnisse sowohl aus dem Bereich der Ostsee (Salzwasser) wie auch von der Landseite (Grundwasser).

Wasser:

Durch die nachgewiesene relativ große saisonale Schwankungsbreite der Ostseewassertemperaturen bzw. der Temperaturen am Meeresgrund (ca. 0 bis 20 °C) ist die thermische Nutzung von Ostseewasser zum Heizen und Kühlen nur eingeschränkt möglich. Im Winter ist die Funktionsfähigkeit von offenen geothermischen Quellensystemen wie Brunnen wegen der zeitweise sehr niedrigen Wassertemperaturen nicht mehr gegeben (Gefahr des Einfrierens der wasserführenden Leitungen und des Wärmetauschers). Im Sommer wäre eine passive Kühlung bei entsprechender Auslegung der gebäudeseitigen Kälteübertrager größtenteils möglich. Bei Überschreitung festgelegter Temperaturgrenzen wäre eine Gebäudekühlung mittels reversibler Wärmepumpe bzw. entsprechend ausgelegter Kältemaschine realisierbar.

Der Einsatz von auf oder unterhalb des Meeresgrundes installierten geschlossenen Wärmeübertragern wie Erdwärmekollektoren ist auch bei Ostseetemperaturen um den Gefrierpunkt möglich, wenn, wie üblich, innerhalb der Kollektorleitungen ein Gemisch aus Wasser und Frostschutzmittel (z.B. Ethylenglykol) genutzt wird. Der prognostizierte Jahresenergieertrag ist vergleichsweise hoch (z.B. Erdwärmekollektor spezifische Jahresarbeit im Heiz- und Kühlbetrieb ca. 120...130 kWh/m²). Werden geschlossene Wärmetauscher im Bereich bewegten Ostseewassers installiert, können durch den konvektiven Wärmetransport mit dem Wasser noch deutlich größere Energiepotentiale erschlossen werden.

5 Genehmigungsrechtliche Rahmenbedingungen zur geothermischen Nutzung

5.1 Allgemeine rechtliche Rahmenbedingungen

Bei der Nutzung von Geothermie/Erdwärme sind vor allem folgende Gesetze, Verordnungen und Verwaltungsvorschriften zu berücksichtigen:

- Bundesberggesetz (BBergG),
- Wasserhaushaltsgesetz (WHG),
- Landeswassergesetze (LWG),
- Verordnungen zum Schutz von Anlagen zur Gewinnung von Trink- und Heilwasser,
- Technische Regelwerke (DIN-Normen, DVGW-Regelwerke, VDI-Richtlinien, „allgemein anerkannte Regeln der Technik“),
- Länderspezifische Regelwerke (Leitfäden, Merkblätter etc.).

Bundesberggesetz BBergG

Erdwärme gilt nach BBergG als bergfreier Bodenschatz. Wird die Erdwärme für Zwecke genutzt, die über das eigene Grundstück hinausgehen, bedarf es zu deren Gewinnung einer Bergbauberechtigung, d.h. einer bergrechtlichen Bewilligung nach §8 BBergG. Diese wird bei der zuständigen Bergbehörde beantragt. Es liegt keine Gewinnung von Erdwärme im bergrechtlichen Sinne vor, wenn die Verbindung von baulicher Nutzung, Erdwärmegewinnung und Grundstück gewahrt bleibt (Abhängigkeit der Genehmigungsvoraussetzung vom Einflussbereich bzw. dem Ort der Nutzung). Unter Umständen ist eine Einzelfallentscheidung erforderlich (gewerbliche Nutzung, bestehende Erlaubnisfelder).

Wasserhaushaltsgesetz WHG

Erdgekoppelte Wärmeübertrager und geothermische Brunnenanlagen unterliegen nach § 8 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) in der Regel der Erlaubnispflicht. Erdwärmekollektoren unterliegen im Normalfall einer Anzeigepflicht.

Zuständige Genehmigungsbehörden sind die Unteren Wasserbehörden der einzelnen Landkreise bzw. kreisfreien Städte.

§ 1 Grundsatz: Jedermann ist verpflichtet, bei Maßnahmen, mit denen Einwirkungen auf ein Gewässer verbunden sein können, die nach Umständen erforderliche Sorgfalt anzuwenden, um eine Verunreinigung des Wassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaft zu verhüten.

§ 2 Erlaubnis- und Bewilligungserfordernis: Eine Benutzung der Gewässer bedarf der behördlichen Erlaubnis.

§ 3 Benutzungen: Benutzungen sind Maßnahmen, die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß schädliche Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Wassers herbeizuführen.

Besondere Schutzgebiete (eingeschränkte Genehmigungsfähigkeit)

Vom Grundsatz her sind Erdwärmennutzungen, Bohrungen oder Entnahmen in Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebieten i.d.R. nicht zulässig. Ausnahmen sind ggf. möglich, doch sind

„sehr strenge Maßstäbe“ anzulegen. Schon bei geringfügigen Restrisiken u.a. für die öffentliche Trinkwasserversorgung ist die Ausnahmezulassung zu versagen („Besorgnisgrundsatz“).

In Nationalparks und anderen besonderen Schutzgebieten wie z.B. Naturschutz- oder Vogelschutzgebieten gilt die jeweilige Schutzgebietsverordnung.

Zu den genehmigungsrechtlich relevanten Grenztemperaturlimits (max. Erhöhung/Absenkung der Temperatur im Untergrund) wird u.a. auf die VDI-Richtlinie 4640 verwiesen. Zulässige Temperaturänderungen wären hier:

geschlossene Systeme (z.B. Erdwärmesonden): „Die Temperatur des zu der/den Erdwärmesonde(n) zurückkehrenden Wärmeträgermediums soll im Dauerbetrieb (Wochenmittel) den Grenzbereich von ± 11 K Temperaturänderung gegenüber der ungestörten Erdreichtemperatur nicht überschreiten; bei Spitzenlast soll ± 17 K Temperaturänderung nicht überschritten werden.“

offene Systeme (geothermische Brunnen): „Die Temperaturveränderung des in den bzw. die Schluckbrunnen zurückgeleiteten Grundwassers sollte ± 6 K nicht überschreiten.“

Leitfäden

Neben den benannten allgemeinen rechtlichen Rahmenbedingungen sind die Anforderungen und Hinweise der jeweiligen länderspezifischen Erdwärme-Leitfäden zu berücksichtigen.

5.2 Vorhabensbezogene genehmigungsrechtliche Anforderungen

Die geothermische Nutzung des Untergrundes bzw. die thermische Nutzung von Grund- oder Ostseewasser unterliegt nach dem Wasserrecht grundsätzlich der Erlaubnispflicht. Daher ist vor Beginn der Maßnahme ein Antrag auf wasserrechtliche Erlaubnis bei der Unteren Wasserbehörde des jeweiligen Landkreises bzw. der kreisfreien Stadt zu stellen, sowie bei den jeweiligen Staatlichen Ämtern für Landwirtschaft und Umwelt, wenn über die Uferlinie hinaus Aktivitäten durchgeführt werden. Diese beteiligen nach Eingangsprüfung der eingereichten Unterlagen (Erlaubnis Antrag bzw. Anzeige) ggf. weitere Fachbehörden (u.a. Küstenschutz, Naturschutz).

Werden Wärmeübertrager oder Brunnen im oder am Meeresgrund bzw. im Hafen installiert, ist darüber hinaus das jeweils zuständige Wasser- und Schifffahrtsamt mit einzubeziehen. Im Bereich touristisch genutzter Strandabschnitte ist die Abstimmung mit der Tourismuszentrale erforderlich (u.a. zu Bauzeiten, Einbautiefen).

Für Geothermievorhaben im Bereich von Küstenschutzgebieten (betreute Küstenabschnitte, land- und seeseitig i.d.R. 200 bis ca. 300 m Abstand zur Uferlinie) gelten besondere Anforderungen. Grundsätzlich dürfen keine Beeinträchtigungen bei der ordnungsgemäßen Unterhaltung und Wehrfähigkeit von Küstenschutzbauwerken durch die Herstellung und den Betrieb von Geothermieranlagen entstehen.

Die Errichtung neuer baulicher Anlagen (hier: Geothermieranlagen) in Küstenschutzgebieten bedarf einer Ausnahmegenehmigung der für den Küstenschutz zuständigen Wasserbehörde (Schleswig-Holstein: Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, Abteilung 4, Mecklenburg-Vorpommern: Staatliche Ämter für Landwirtschaft und Umwelt).

Strandabschnitte mit wiederholten Erhaltungsmaßnahmen (z.B. Aufspülungen) werden genehmigungsrechtlich als Küstenschutzanlagen behandelt und sind nach Einzelfallprüfung

grundsätzlich genehmigungsfähig. Die Integration von Erdwärmekollektoren oder horizontalen Brunnen in Deiche oder Dünenbauwerke ist nach aktuellem Kenntnisstand nur in Ausnahmefällen erlaubnisfähig und erfordert eine strikte Beachtung der technischen und verfahrensrechtlichen Regelwerke (u.a. *EAK 2002/2007*, *Regelwerk Küstenschutz*) sowie eine vergleichsweise aufwendige Nachweisführung (u.a. statische Berechnungen).

6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

6.1 Investitionskostenschätzung

Nachfolgend sollen die zur Errichtung der untersuchten Geothermieranlagen erforderlichen Komponenten einer teilweise überschlägigen Kostenkalkulation unterzogen werden, um so eine erste Bewertung der potentiellen Gesamt-Investitionskosten und daraus ableitend der jeweiligen Mehrinvestition für die Geothermie gegenüber einer konventionellen ausschließlichen Wärme- bzw. Kälteversorgung mit konventionellen Energieträgern (Strom, Gas, Öl, Fernwärme) zu ermöglichen. Alle Angaben sind netto, d.h. ohne Mehrwertsteuer.

Die berücksichtigten Anlagenkomponenten haben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Schätzkosten beruhen auf einer Recherche der aktuellen Preise am Markt und sind unverbindlich. Eine Präzisierung der überschlägig ermittelten Investitionskosten ist erst nach weiteren Teilplanungsleistungen mit Kostenberechnung und der Einholung von projektspezifischen Angeboten möglich.

Kosten für die geothermische Quellenanlage :

Die nachfolgend angegebenen spezifischen Investitionskosten (Marktpreise Stand 2014) berücksichtigen bereits die erforderlichen Aufwendungen zur Herstellung der horizontalen hydraulischen Anbindung bis zur Geoenergiezentrale (inkl. Rohrleitungen, Verteilerschächte mit Verteilern und Durchflussreglern, Absperrvorrichtungen, Wärmeträgerfluid).

Es bestehen in Bezug auf die Herstellungskosten für alle betrachteten Systeme entsprechende Abhängigkeiten zu den vor Ort angetroffenen geologischen bzw. hydrogeologischen Bedingungen, aber auch zu den Anforderungen an die Bauausführung (u.a. Erfordernis einer Wasserhaltung, Einsatz von Horizontalbohrtechnik für die hydraulische Anbindung, Entfernung bis zur Geoenergiezentrale, bauseitige Bereitstellung von Baustrom und Bauwasser usw.).

Eine Installation unter Wasser (am oder im Meeresgrund) ist durch den erforderlichen Einsatz von Tauchern und Spezialgerät voraussichtlich mit höheren Kosten verbunden (projektspezifische Angebotsabfrage erforderlich).

Bei der Verlegung von Erdwärmekollektoren unterhalb von Dünenbauwerken wird davon ausgegangen, dass dies im Rahmen von Erhaltungs- oder Neubaumaßnahmen erfolgt (ggf. Einsparung von Baukosten bei Verlegung im Dünenfuß).

Tabelle 7: Investitionskosten für die betrachteten geothermischen Quellsysteme (Schätzung)

Quellsystem	spezifische Investitionskosten	durchschnittliche Investitionskosten 100 kW
Erdwärmekollektor	15-17 €/m ²	40.000 € (2.500 m ²)
vertikale Spiralsonden (ca. 3 m Installationslänge)	450-550 €/Stück	49.000 € (98 Stück)
Horizontalbrunnen (DN 180)	700-800 €/m	40.000 € (50 m)

Kosten für zusätzlich erforderliche Installationen/Ausrüstung (gebäudeseitig):

Die Mehrkosten der gebäudeseitigen Installationen für eine geothermische Nutzung (hier: Wärmepumpe, Trennwärmetauscher, Pumpen, MSR) wurden ebenfalls den aktuellen Marktpreisen entnommen bzw. in Rücksprache mit Herstellern abgeschätzt. Die Kosten der Wärmepumpe wurden exemplarisch für ein Gerät mit ca. 100 kW Entzugsleistung abgeschätzt (inkl. Kühlfunktion, reversibel).

Tabelle 8: Mehrkosten für zusätzlich erforderliche Installationen/Ausrüstung

Quellsystem	Zusätzlich erforderliche Installationen/Ausrüstung	Mehrkosten
Erdwärmekollektor	Wärmepumpe, MSR	50.000 €
vertikale Spiralsonden (ca. 3 m Installationslänge)	Wärmepumpe, MSR	50.000 €
Horizontalbrunnen (DN 180)	Wärmepumpe, MSR, Trennwärmetauscher, Saugpumpe, Abschlageleitung	80.000 €

Einsparungen durch den Einsatz von Geothermie:

Einsparpotentiale ergeben sich u.a. durch eine mögliche Reduzierung der Auslegungsleistung konventioneller Wärme- und Kälteerzeuger wie Gas-Brennwert-Kessel oder Kältemaschinen. Bei einer monovalenten Auslegung der Geothermieanlage kann sogar vollständig auf zusätzliche Wärme- und/oder Kälteerzeuger sowie ggf. auf eine Abgasführung („Schornstein“) verzichtet werden. Weitere erhebliche Einsparpotentiale sind durch die Vermeidung von Erschließungskosten realisierbar (Gas, Fernwärme).

Diese normalerweise erforderlichen Investitionen können den Investitionskosten der Geothermie gegengerechnet werden.

Für die exemplarische Betrachtung werden für die Substitution von 100 kW Kälte- bzw. Heizleistung Einsparungen von pauschal 25.000 € berücksichtigt (konservativer Ansatz ohne Einsparungen für Erschließung, Abgasführung u.a.).

Investitionskostenschätzung (Mehrkosten Geothermie):

Nachfolgende Investitionskostenschätzung bezieht sich auf eine exemplarisch betrachtete Leistungsgröße der Geothermieranlage von ca. 100 kW (Entzugs- oder Injektionsleistung). Es gelten die zuvor getroffenen Annahmen und Kostenansätze.

Tabelle 9: Investitionskostenschätzung Geothermie (Mehrkostenansatz, Beispielanlage 100 kW)

Quellensystem	Investitionskosten 100 kW (Mehrkosten Geothermie)
Erdwärmekollektor	65.000 €
vertikale Spiralsonden	74.000 €
Horizontalbrunnen	95.000 €

6.2 Betriebs- und Verbrauchskostenschätzung

Die betriebsgebundenen Kosten enthalten die erwarteten Kosten für Bedienung und Wartung. Diese sind bei den betrachteten Varianten mit geschlossenen Wärmeübertragerrohren (hier: Erdwärmekollektor, Spiralsonde) sowie bei einer konventionellen Wärmeversorgung ähnlich einzuschätzen und werden deshalb nicht gesondert ausgewiesen.

Eine Brunnenanlage benötigt aufgrund des Funktionsprinzips (offenes System, Grund- bzw. Meerwasser durchströmter Primärkreis) eine regelmäßige, den Erfordernissen angepasste Überprüfung und Wartung/Reinigung (ggf. Regeneration). Die Wartungskosten für eine horizontale Brunnenanlage betragen schätzungsweise ca. 1.500 €/a (mehrjähriges Mittel). Die jährlichen Wartungskosten für Brunnen wurden in der nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsprognose rechnerisch berücksichtigt.

Die potentiellen Energiekosten-Einsparungen durch die Geothermie richten sich u.a. nach den ortspezifischen Bezugspreisen für Gas/Öl/Fernwärme und Strom. Um einen Vergleich der Betriebskosteneinsparungen der betrachteten Geothermieranlagen zu der konventionellen Wärme- und Kälteversorgung darzustellen und eine erste überschlägige Ermittlung der statischen Amortisation zuzulassen wurden folgende Bezugspreise abgeschätzt:

- Bezugspreis Strom (Mischpreis): 20,0 ct/kWh_{th} (netto).
- Bezugspreis Gas/Öl/Fernwärme (Mischpreis): 7,0 ct/kWh_{th} (netto).

Die verbrauchsgebundenen Kosten richten sich u.a. nach Energiemengen, welche durch die örtlichen Versorger bereitzustellen sind. Bei der Geothermie wird die bereitzustellende elektrische Energie zum Betrieb der erdgekoppelten Wärmepumpenanlage durch die

Jahresarbeitszahl (JAZ) bestimmt. Bei einer anzustrebenden JAZ von $>4,0$ im Heizbetrieb wird mit 1 kWh elektrischer Energie etwa 4,0 kWh thermische Energie erzeugt. Bei der geothermischen Warmwasserbereitung wird eine Jahresarbeitszahl von 3,0 ($1 \text{ kWh}_{\text{el}} = 3 \text{ kWh}_{\text{th}}$) und für den passiven und nachgeordnet aktiven Kühlbetrieb eine JAZ von 6,0 berücksichtigt.

Für die Berechnung einer möglichen Amortisationszeit im kombinierten Heiz- und Kühlbetrieb wird rechnerisch eine mittlere JAZ von 5,0 zugrunde gelegt.

6.3 Kurzbetrachtungen zur Wirtschaftlichkeit

Es werden ausschließlich die Mehrkosten der geothermischen Wärme- bzw. Kälteversorgung gegenüber der Energieversorgung mit konventionellen Energieträgern (Gas/Öl/Kohle) zugrunde gelegt und mit den jährlichen Betriebskosteneinsparungen ins Verhältnis gesetzt.

Das Ergebnis der statischen Berechnung berücksichtigt keine zukünftigen Energiepreisteigerungen und kapitalgebundene Kosten bzw. Kapitalzinsen. Die derzeitige Niedrigzinsphase begünstigt grundsätzlich Investitionen.

Gemäß den aktuellen Daten des statistischen Bundesamtes betrugen die Preissteigerungen auf dem Energiemarkt im Zeitraum der Jahre 2000 bis 2013 (13 Jahre) durchschnittlich ca. 7,5 %/a jeweils bei Gas und bei Strom (hier: „Daten zur Energiepreisentwicklung“, Verbraucherindex). Bei einer dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnung mit entsprechend angesetzten jährlichen Preissteigerungsszenarien würde die Wirtschaftlichkeit von Geothermieranlagen im Vergleich zur konventionellen Wärme- und Kälteversorgung eine steigende jährliche Kostenersparnis aufweisen. Bei der Ermittlung der potentiellen Betriebskosteneinsparungen und des voraussichtlichen Amortisationszeitraumes ist zu berücksichtigen, dass sich auch eine weitere parallele Preissteigerung der Primärenergieträger zugunsten der Geothermie auswirkt.

Weiterhin ist bei einer objektiven Betrachtung auch die Berücksichtigung von ggf. anfallenden Investitionskosten für baukonstruktive/alternative technische Maßnahmen zur Erfüllung der Anforderungen des EEWärmeG und der aktuellen Energieeinsparverordnung erforderlich.

Für die drei betrachteten geothermischen Quellenanlagen wurden nachfolgende (statische) Amortisationszeiten abgeleitet (Tabelle 10).

Tabelle 10: Prognostizierte Amortisationszeiten (statisch) der untersuchten Geothermieranlagen

Stand-ort	geothermische Quellenanlage [exemplarisch, ca. 100 kW Entzugs- bzw. Injektionsleistung berücksichtigt]	statische Amortisation der Mehrkosten [a] [berücksichtigt: heizen & kühlen]	statische Amortisation der Mehrkosten [a] [berücksichtigt: <u>nur</u> heizen]
Düne	Erdwärmekollektor	5,5	22,2
	vertikale Spiralsonden	13,3	60,3
	Horizontalbrunnen	6,0	12,2
Strand	Erdwärmekollektor	7,2	26,5
	vertikale Spiralsonden	15,9	55,5
	Horizontalbrunnen	8,2	17,4
Wasser	Erdwärmekollektor	5,5	26,5
	vertikale Spiralsonden	n.m.	n.m.
	Horizontalbrunnen	18,9	115,9

Im Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung lässt sich zusammenfassen, dass die ermittelte Amortisierungszeit von ca. 5,5...18,9 Jahren für alle Anlagen mit saisonalem Heiz- und Kühlbetrieb innerhalb der Lebensdauer der geothermischen Installationen liegt (geschlossenen Systeme >70 Jahre, Brunnen bei angemessener regelmäßiger Wartung ca. 15-25 Jahre). Die Lebensdauer von Wärmepumpen beträgt typischerweise ca. 20 - 25 Jahre. Die Systeme Erdwärmekollektor und Horizontalbrunnen weisen die niedrigsten Amortisationszeiträume auf und sind daher als Vorzugsvarianten zu betrachten.

Insbesondere für einen vergleichsweise kostengünstig herzustellenden horizontal verlegten Erdwärmekollektor wird gemäß den Modellberechnungen ein sehr gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis prognostiziert wenn er für Heiz- und Kühlzwecke verwendet wird. Die erwartete statische Amortisation eines Erdwärmekollektors beträgt im dargestellten Fall ca. 5-7 Jahre.

Die Herstellung von Geothermieranlagen ausschließlich für die Wärmeerzeugung rechnet sich entsprechend der Berechnungsergebnisse nur in Ausnahmefällen (hier: Horizontalbrunnen im Bereich der Düne oder Strand).

Die Wirtschaftlichkeit (aber auch die CO₂-Bilanz) ließe sich durch die Nutzung von selbst erzeugtem Solar- oder Windstrom für die Wärmepumpe weiter deutlich verbessern. Die Gestehungskosten von Solarstrom betragen aktuell zwischen 9 und 13 ct/kWh netto (Windkraft ca. 6 bis 11 ct/kWh) und liegen damit unter den Energiepreisen der regionalen Stromanbieter.

7 Hinweise zum Entwurf bzw. zur Ausführung der

Vorzugsvarianten

Ergänzend zur allgemeinen Beschreibung der betrachteten geothermischen Quellsysteme (Punkt 4.3) sollen nachfolgend spezielle Hinweise zum Entwurf bzw. zur Ausführung der Vorzugsvarianten gegeben werden.

7.1 Thermische Horizontalbrunnen

Für die Verlegung eines horizontalen Filterstranges im Bereich der Dünen oder am Strand sind an den Flachküsten der Ostsee vergleichsweise günstige geologische/hydrogeologische Standortbedingungen gegeben. Im exemplarischen Untersuchungsgebiet in Warnemünde dominieren oberflächennah Dünensande und Strandwallsande (Fein- bis Mittelsand, teilweise grobsandig bis feinkiesig) aus dem Holozän [1].

Ein möglichst hoher hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwert der wassergesättigten Bereiche des oberen Grundwasserleiters ist neben der einer möglichst mächtigen Grundwasserüberdeckung des Filterstranges entscheidend für die Leistungsfähigkeit eines Horizontalbrunnens.

Auf der Basis von vorliegenden Kornanalysen aus den benannten geologischen Schichten beträgt die hydraulische Durchlässigkeit ($k_{f,h}$) der nachgewiesenen Mittel- und Feinsande zwischen ca. $2 \text{ bis } 3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (Einschätzung nach DIN18 130-1: hydraulisch „durchlässig“).

Die mögliche Grundwasserüberdeckung des Filterstranges schwankt jahreszeitlich und beträgt im Bereich Warnemünde ca. 2...3 m. Eine Absenkung des Wasserspiegels bis in den Filterbereich ist aus technischen Gründen zwingend zu vermeiden. Unter Berücksichtigung der benannten wichtigsten Auslegungskriterien wird gemäß der Simulationsergebnisse und den vorliegenden Erfahrungen bereits realisierter Anlagen je nach gewähltem Ausbau (u.a. Rohrdurchmesser, Filterschlitzweite) eine spezifische Entnahmerate von ca. 0,3 bis 0,6 m³/h je Meter Filterstrang erwartet (gewählter Ausbau ca. DN 180 bis DN 200).

Unter Berücksichtigung einer exemplarisch betrachteten thermischen Leistung von ca. 100 kW und einer zulässigen maximalen Temperaturspreizung von 6 K beträgt der erforderliche Mindestvolumenstrom ca. 15 m³/h (minimale Filterstranglänge ca. 50 m). Andere Konfigurationen sind ebenfalls realisierbar (z.B. 100 kW, 22 m³/h bei 4 K). Aufgrund der sukzessiven Brunnenalterung ist grundsätzlich eine Überbemessung des Filterstranges mit einzuplanen (> 30 %).

Zur Absicherung eines nachhaltigen Brunnenbetriebes wird für die Wiedereinleitung des thermisch genutzten Grundwassers eine separate Abschlageleitung in die Ostsee empfohlen.

Ergebnisse einer Grundwasseranalyse aus dem Bereich des oberen Grundwasserleiters in Warnemünde liegen vor und belegen für den Zeitpunkt der Probenahme (Oktober 2010) erhöhte Werte für abfiltrierbare Stoffe, DOC, Chlorid, Sulfat und Eisen. Erfahrungsgemäß ist eine zunehmende Verockerung von Horizontalbrunnen im Betrieb anzunehmen.

Das Einströmen bzw. Ausströmen des Grundwassers in den Brunnen sollte laminar erfolgen und darf nicht zu Turbulenzen führen. Durch turbulentes Einströmen des Grundwassers kann es zu einer Störung des chemischen Gleichgewichtszustandes des Grundwassers und somit

zu einem Ausfällen von gelösten Stoffen kommen (hier u.a. Eisen). Die Ausfällung gelöster Stoffe und die Bildung von Bakterienkolonien führen u.a. zu einer stark beschleunigten Inkrustation und „Verockerung“ des Brunnens und können schließlich ein vollständiges Verstopfen der Brunnenfilter verursachen. Des Weiteren kann es bei einer zu hohen Eintrittsgeschwindigkeit (Turbulenz) des Grundwassers zu einem Mitreißen des Feinkornanteils aus dem Grundwasserleiter und damit zur Versandung bzw. Kolmation des Brunnens kommen.

Der Anlagenausbau muss unter den gegebenen Bedingungen korrosionssicher erfolgen. Als Ausbaumaterialien kommen für die wasserberührenden Anlagenbauteile Kunststoff und spezieller V4a-Stahl in Frage. Die Verwendung eines Titanwärmetauschers ist vorzusehen.

Die Horizontalbrunnen können mit dem Verfahren der grabenlosen gesteuerten Horizontalbohrtechnik oder mittels offenem Verbau und Wasserhaltung errichtet werden. Beim grabenlosen Verfahren ist für die Verlegung des Filterstranges ein Verfahren ohne Bohrspülung zu wählen (z.B. „Erdrakete“). Als Filter können neben gelochten oder geschlitzten Kunststoffrohren auch Edelstahlwickeldrahtfilter eingesetzt werden (Materialanforderungen mit Hersteller abstimmen). Die Brunnenleitungen müssen über Revisionsschächte befahrbar sein.

Veränderungen der Küstenlinie (Rückschnitt oder Progradation) wirken sich auf das hydraulische wie auch das thermische Regime im seeseitigen Anstrombereich des Brunnens aus. Sturmflutereignisse können nachweislich die Küstenlinie schlagartig um mehrere Meter verlagern. Auch anthropogene Einflussnahme wie Sandaufspülungen können zu Veränderungen der hydraulischen und somit auch der thermischen Parameter führen.

Die konkrete Planung eines horizontalen thermischen Brunnens ist für den jeweiligen Vorhabensstandort auf der Grundlage der Ergebnisse ortsspezifisch durchzuführender Erkundungs- und Testarbeiten (u.a. Siebanalysen, Pumpversuche, Wasseranalysen) vorzunehmen.

7.2 Horizontale Erdwärmekollektoren

Wichtige Voraussetzung für den effizienten Betrieb von Erdwärmekollektoren ist eine Verlegung der Einzelkreise sowie der Sammel- und Verteilerleitung nach aktuellem Stand der Technik (Abstände zwischen Vor- und Rücklauf, Einhaltung der zulässigen Biegeradien) und die Einhaltung der Anschluss- und Verlegerichtlinien gemäß VDI-Richtlinie 4640.

Die Einzelkreise von Erdwärmekollektoren sollten mit Volumenstromsettern hydraulisch abgleichbar sein. Bei Anschluss der Kollektorleitungen nach dem Tichelmann-Prinzip ist ein Nachweis gleicher Strömungsverhältnisse in den Einzelkreisen (Abweichung max. 10 %) erforderlich.

Kalte Anlagenteile (Kollektor- sowie Sammel- und Verteilerleitungen) müssen zu Ver- und Entsorgungsleitungen einen Abstand von mindestens 1 m einhalten.

Bei den Erdarbeiten sind alle gesetzlichen Bestimmungen und Vorschriften (u.a. Sicherheitsvorschriften) einzuhalten. Bei der Herstellung der Baugrube/Gräben ist die DIN 4124 zu berücksichtigen. Die Geländekubatur und ein möglicher horizontal abweichender Schichtenverlauf sind bei der Ausführungs- und Werksplanung eines Kollektorfeldes zu berücksichtigen (u.a. relevant für die Entlüftung der Einzelkreise). Im Bereich der wassergesättigten Sande unterhalb von Dünen oder dem Strand wird aufgrund der

hydrogeologischen Standortbedingungen eine Wasserhaltung für die Kollektorherstellung erforderlich.

Hinweise zur Planung von Erdwärmekollektoren im Bereich von Stränden:

Bei der Planung der Verlegung von Wärmeübertragern im direkten Einflussbereich der Ostsee sind starke Krafteinwirkungen und/oder langfristige Setzungen bzw. Auftrieb mit zu berücksichtigen (u.a. „worst case“ Szenarien mit maximalem Sandabtrag durch Sturmfluten). Eine Verankerung des Kollektorfeldes ist entsprechend einzuplanen (z.B. mittels gerammten Stahlprofilen).

Im Bereich von Auftragsküsten (z.B. Warnemünde) sollte ein Mindestabstand der Wärmeübertrager zur Geländeoberfläche von 2 m eingehalten werden. Erforderliche Leitungsquerungen durch Dünen oder Deiche wie z.B. von Vor- und Rücklaufleitungen für Erdwärmekollektoren sind nach Einzelfallprüfung ggf. zulässig (u.a. Grundsatz „Erhaltung der Wehrfähigkeit“). Diese sind möglichst mit Schutzrohr auszuführen [7].

Hinweise zur Planung von Erdwärmekollektoren im Bereich von Dünen und Deichen:

Die Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken (EAK 2002) ist die maßgebliche technische Richtlinie für Küstenschutzbauwerke.

Da die potentielle Verlegeebene von Erdwärmekollektoren - unterhalb von Dünen und Deichen - üblicherweise zum Bauwerk gehört [7], unterliegt die diesbezügliche Planung den Anforderungen der bestehenden technischen Richtlinien bzw. Regelwerke für Küstenschutzbauwerke und deren Schutzstreifen [8, 9, 10].

Deiche und deren Schutzstreifen (≥ 3 m) unterliegen in Mecklenburg-Vorpommern gemäß § 74 LWaG besonderen Restriktion. Zu Ihrem Schutz ist insbesondere „...das Errichten oder Verändern von Bauwerken und Anlagen, das Aufstellen, Lagern oder Ablagern von Gegenständen aller Art sowie das Verlegen von Rohren, Kabeln und anderen Leitungen“ verboten.

Nach den Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken [10] können „Leitungen [...] im Untergrund [...] angeordnet werden“ und „bei Verlegung von Leitungen in Schutzdünen ist am äußeren Dünenfuß eine ausreichende Leitungsüberdeckung bei ungünstiger Strandlage vorzusehen. Dabei ist ein künftiger Dünenabbruch vorsorglich zu berücksichtigen“. Zu den Schutzdünen gehört i.d.R. ein ca. 5 m breiter see- und landseitiger Schutzstreifen.

Die Standsicherheit von Dünen und Deichen darf grundsätzlich nicht durch den Einbau von Wärmeübertragerleitungen sowie deren Betrieb gefährdet werden. Die dazu erforderliche statische Nachweisführung beinhaltet u.a. den Nachweis gegen Böschungsbruch, Gleiten und Auftrieb unter Berücksichtigung der Bildung eines temporären Eispanzers um die Wärmeübertragerleitungen.

Es werden grundsätzlich zwei Arten von Dünen unterschieden. Bei einer Systemschutzdüne werden Überspülungen erlaubt. Eine Vollschutzdüne dient als alleiniger Sturmflutschutz und besteht aus einem Verschleiß-, Reserve- und Sicherheitsteil (Abb. 41).

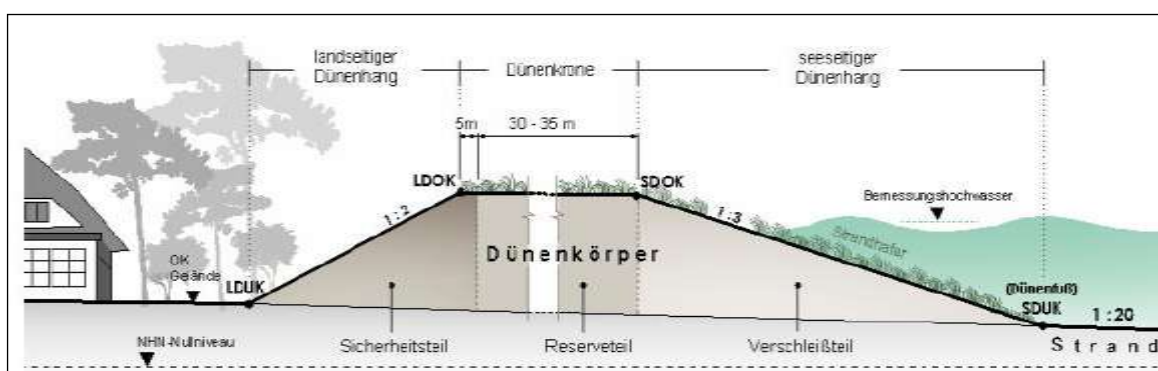


Abb. 41: Regelprofil einer Vollschutzdüne [8]

Seit 2004 findet die Dünendimensionierung „auf der Basis von numerischen Modellierungen mit einem Quertransportmodell“ statt („Die Küste 76“, S. 41f.). Wiederholte Aufspülungen müssen bei allen Dünenarten durchgeführt werden. „Dabei wird zusätzlich zur Solldünendimension ein seeseitiger Verschleißteil angelegt, der so dimensioniert wird, dass er in der Regel frühestens nach 5 Jahren dem völligen Abtrag unterlegen ist und erst dann die nächste Sandaufspülung erforderlich wird“ („Die Küste 76“, S.42). Das Sandvolumen im Reserveteil entspricht dem Volumen, das durch eine Bemessungsturmflut umgelagert wird.

Die Planung eines Erdwärmekollektors unterhalb von Dünen kann auch im Bereich des Verschleißteils erfolgen, wenn eine adäquate Verankerung des Kollektorfeldes im tieferen Untergrund gewährleistet ist.

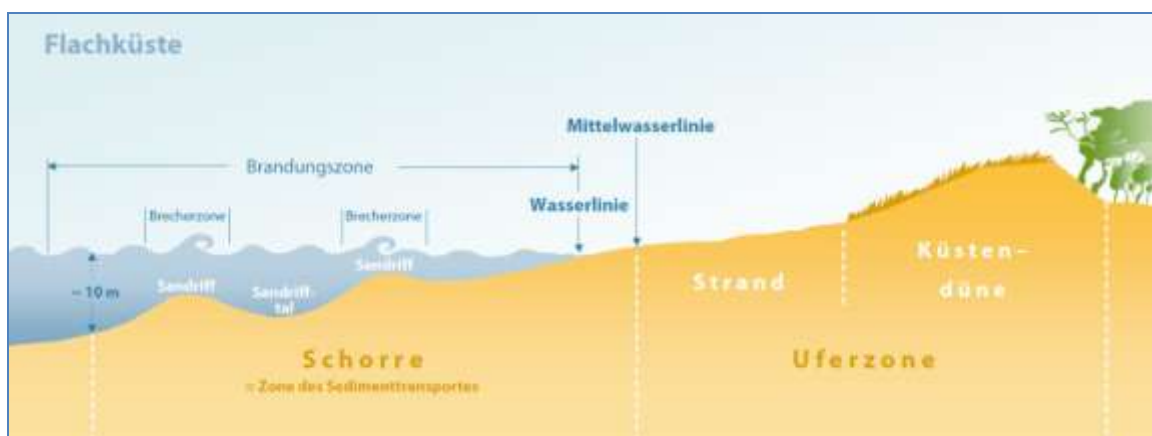
8 Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse und Entscheidungsleitfaden

8.1 Übertragbarkeit und mögliche Nutzungsstandorte

An der deutschen Ostseeküste werden von ca. 830 km Außenküste ca. 600 km durch Küstenschutzdeiche und -Dünen gegen die Gefahren von Hochwasserereignissen wie z.B. Sturmfluten geschützt. Ungefähr 500 km der Ostseeküste sind als Flachküste ausgebildet (Schema siehe Abb. 42), von denen geschätzte 350 km durch Küstenschutzanlagen abgesichert sind.

Im unmittelbaren Küstenbereich dominieren Küstenschutzdünen, im Bereich der Bodden, Förden, Buchten und Flussmündungen wurden überwiegend Deiche errichtet.

Für die Installation von Geothermieranlagen im Bereich von Stränden eignen sich besonders Ausgleichs- und Akkumulationsbereiche (ca. 35 % der deutschen Außenküste, entspricht ca. 250 km, siehe auch Abb. 43). Für die Untersuchung im Rahmen von *RADOST* wurde eine Ausgleichsküste ausgewählt. In den Küstenabschnitten mit wiederholter oder fortschreitender Abrasion ist die Herstellung von Wärmeübertragern in Strandabschnitten mit zusätzlichen Risiken verbunden bzw. nicht realisierbar.

**Abb. 42:** Schematisches Profil einer Flachküste [8]

Die Installation von Erdwärmekollektoren oder thermischer Brunnen unterhalb von Deichen oder Dünen ist theoretisch in allen geschützten Küstenabschnitten möglich. Da sich Wärme bzw. Kälte i.d.R. nur verlustbehaftet (hier: Druck- und/oder Temperatur) über längere Strecken transportieren lässt und die Herstellung der unterirdischen Leitungen mit

entsprechenden Kosten verbunden ist, sind die Leitungslängen für eine Anbindung der zu versorgenden Gebäude möglichst kurz zu halten. Eine vorhandene oder geplante Bebauung im nah angrenzenden Hinterland des thermisch genutzten Küstenabschnitts hinter der Küstenschutzanlage ist demnach zweckmäßig (maximal bis etwa 2. Baureihe).

Den Kriterien entsprechend wären insbesondere touristisch erschlossene Küstenbereiche wie Zinnowitz, Binz, Prerow, Warnemünde, Travemünde, Niendorf oder Timmendorf als potentielle Nutzungsstandorte für die Kombination von Küstenschutz- und Geothermieanlagen prädestiniert.

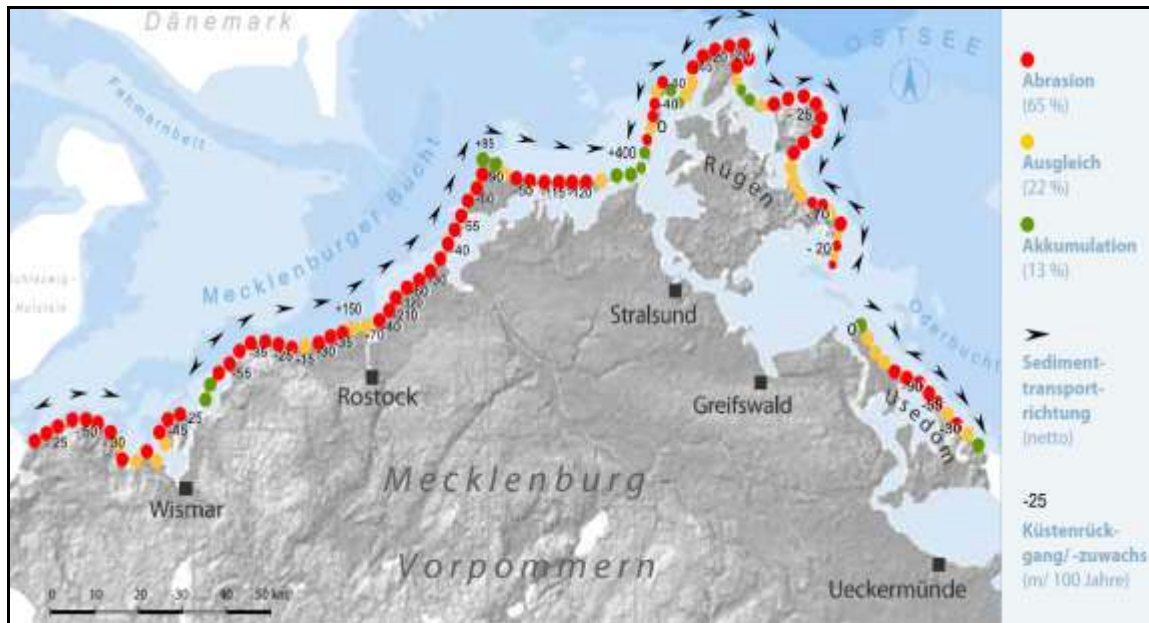


Abb. 43: Küstendynamische Prozesse an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns [8]

8.2 Entscheidungsleitfaden

Der nachfolgend dargestellte Entscheidungsleitfaden (Abb. 44) berücksichtigt ausschließlich die im Ergebniss der Untersuchungen festgestellten Vorzugsvarianten (hier: Erdwärmekollektor und Horizontalbrunnen im Strandbereich oder unterhalb von Dünen/Deichen). Die Kombination von sonstigen Küstenschutzbauwerken wie Buhnen, Wellenbrecher und Spundwände erfordert aufgrund der speziellen Anforderungen und Vielzahl möglicher Ausführungsvarianten eine projektspezifische Betrachtung.

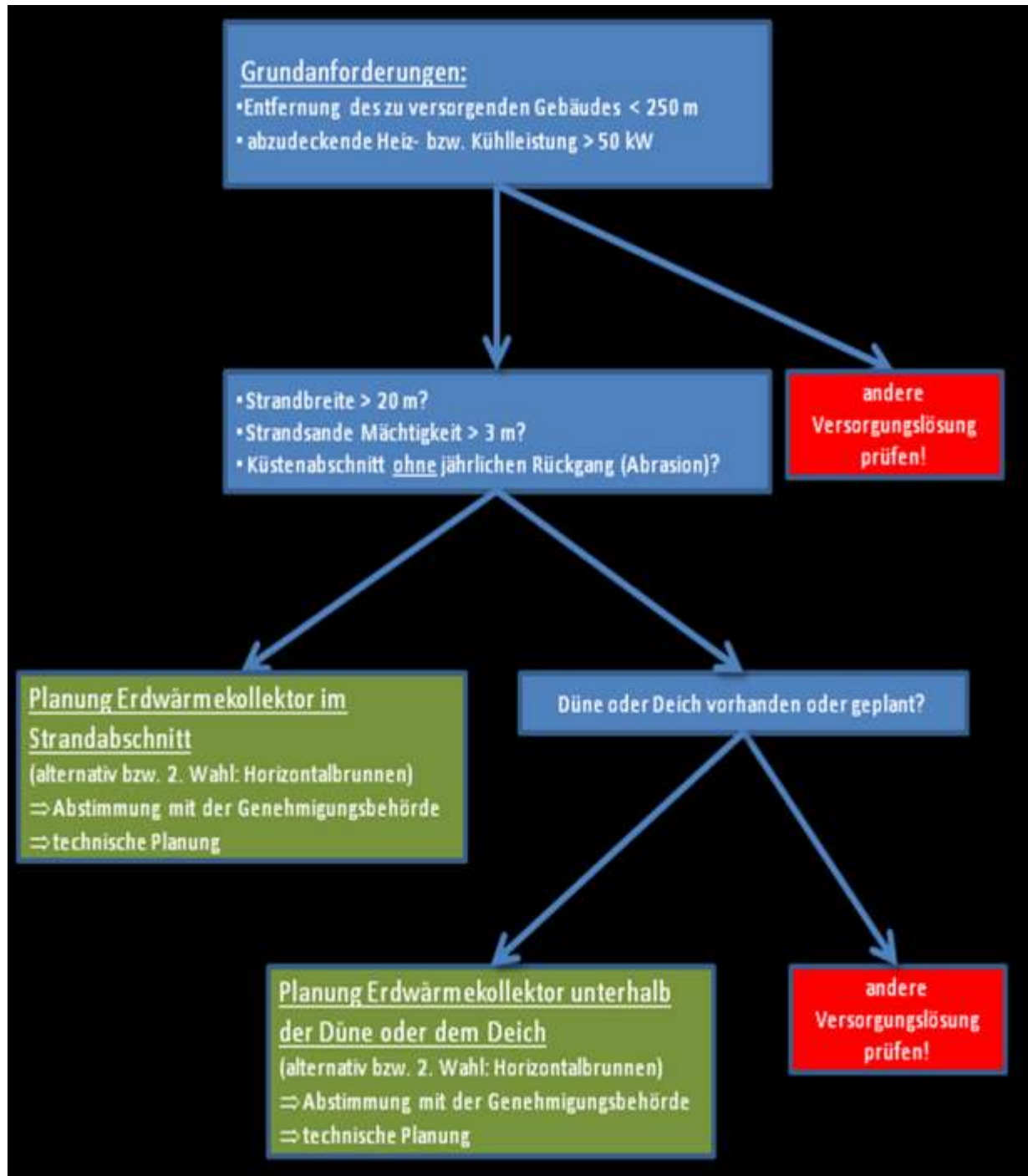


Abb. 44: Entscheidungsleitfaden zur Kombination von Geothermie mit Küstenschutzanlagen (Auswahl)

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des RADOST-Anwendungsprojektes „Küstenschutz und Geothermie“ wurden technische Möglichkeiten zur Gewinnung von Wärme oder Kälte aus dem Küstenbereich durch die thermische Nutzung von "Strandwasser" (einem Gemisch aus Grund- und Meerwasser) oder Meerwasser betrachtet. Es sollte aufgezeigt werden, wie diese Form der Energiegewinnung bei der Errichtung oder Unterhaltung von Küstenschutzanlagen wie Dünen und Deichen planerisch integriert werden kann.

Die erforderlichen Grundlagendaten für eine Beurteilung des thermischen Potentials im Küstenbereich bzw. des Meerwassers wurden über einen Zeitraum von 26 Monaten durch ein eigens dafür von der *H.S.W. GmbH* eingerichtetes Messfeld vor Warnemünde ermittelt. Die Messergebnisse zeigen einige weitestgehend nur theoretisch bekannte Interaktionen von Meer und Grundwasser sowie die jahreszeitlich schwankenden Umwelteinflüsse in unterschiedlicher Tiefe.

Aufbauend auf der Auswertung der Daten und Modellierung der betrachteten geothermischen Quellsysteme (horizontale Erdwärmekollektoren, vertikale Spiralwärmetauscher und Horizontalbrunnen) wurden Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen durchgeführt und Vorzugsvarianten für die Umsetzung identifiziert.

Insbesondere für die vergleichsweise kostengünstig herzustellenden horizontal verlegten Erdwärmekollektoren, aber auch für thermische Brunnen, wird gemäß den Modellberechnungen ein sehr gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis prognostiziert (Amortisationszeit ca. 5...8 Jahre). Die geothermischen Anlagen sollten idealerweise zur kombinierten Wärme- und Kälteerzeugung genutzt werden (dualer Betrieb oder saisonal wechselnd). Ein ausschließlicher Heizbetrieb ist gemäß den durchgeführten Berechnungen nur in Ausnahmefällen nachhaltig wirtschaftlich.

Mit einem fußballfeldgroßen horizontalen Erdwärmekollektor könnten z.B. die derzeit größten Hotels an der Ostseeküste wie das *Neptun* in Warnemünde oder das *Maritim* in Travemünde vollständig beheizt und gekühlt werden. Die jährlich vermiedene CO₂-Emission wäre in diesem Beispiel beträchtlich und beträgt über 25 Betriebsjahre ca. 5.000 t (berücksichtigte Vergleichswerte: Wärmeerzeugung mit Erdgas ca. 200 g/CO₂/kWh, Wärmepumpenstrom ca. 100 g/CO₂/kWh). Eine CO₂-freie Wärme- und Kältebereitstellung wäre durch den Einsatz von regenerativ erzeugtem Wärmepumpenstrom machbar.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen grundsätzlich ein großes Potential für die thermische Nutzung von Strand- bzw. Meerwasser zum Heizen/Kühlen von küstennaher Bebauung (u.a. Wohnhäuser, Büros, Hotels, Gastronomie, Freizeitanlagen). Speziell touristische Einrichtungen können durch eine nachhaltige Energiekostenreduzierung und entsprechendes Marketing (z.B. „Green Building“-Zertifizierung oder „Plusenergiehotel“) Wettbewerbsvorteile erlangen bzw. negative Folgen des Klimawandels kompensieren (u.a. erhöhter Kühlbedarf).

Bei der Planung von Wärmetauschern in Küstenschutzbauwerken (u.a. Dünen, Deiche, Strandabschnitte) sind insbesondere die küstendynamischen Vorgänge und die technischen Regelwerke zu berücksichtigen (u.a. Verankerung der Kunststoffrohre, Vermeidung von bauwerksp parallelen Leitungen). Erste positive Betriebserfahrungen mit einem 60 m langen Horizontalbrunnen im Strandbereich von Warnemünde liegen vor und belegen generell die Machbarkeit einer oberflächennahen Geothermienutzung im Strandbereich.

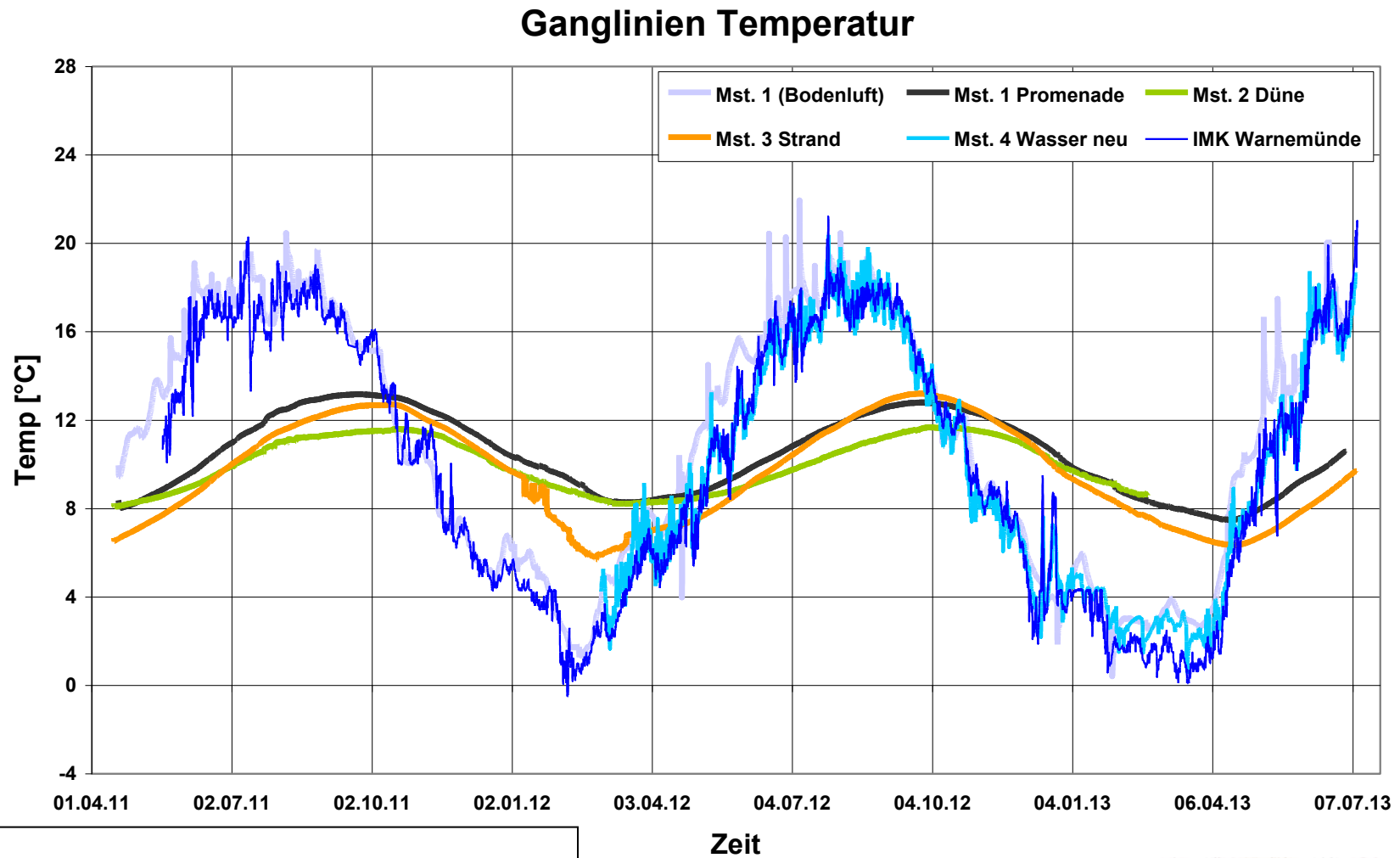
Eine grundsätzliche Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse ist für vergleichbare Küstenregionen gegeben (hier: Ausgleichs- oder Auftragsküsten). Für spezielle Küstenschutzmaßnahmen wie z.B. Absperrbauwerke können bereits verfügbare technische Speziallösungen wie „thermisch aktivierte Spundwände“ zur Energiegewinnung eingesetzt werden.

Unter Berücksichtigung genehmigungsrechtlicher und baukonstruktiver Anforderungen wird derzeit die Herstellung von horizontalen Erdwärmekollektoren (geschlossenes System) im Bereich von Strandabschnitten favorisiert. Bei der Planung von horizontal verlegten Brunnen (offenes System) im Bereich von Küstenschutzanlagen ist u.a. die regelmäßig durchzuführende Reinigung des Filterbereiches zu beachten.

Als Grundlage für die Planung von Erdwärmekollektoren oder Horizontalbrunnen unterhalb von Dünen und Deichen sind in Zusammenarbeit mit den jeweils zuständigen Fachabteilungen der Genehmigungsbehörden weiterführende Untersuchungen erforderlich (hier: statische Berechnungen, Nachweis der Unbedenklichkeit).

Im Projektanschluss werden die Durchführung eines Pilotprojektes und die Publikation praktischer Erfahrungen angestrebt.

10 Anlagen

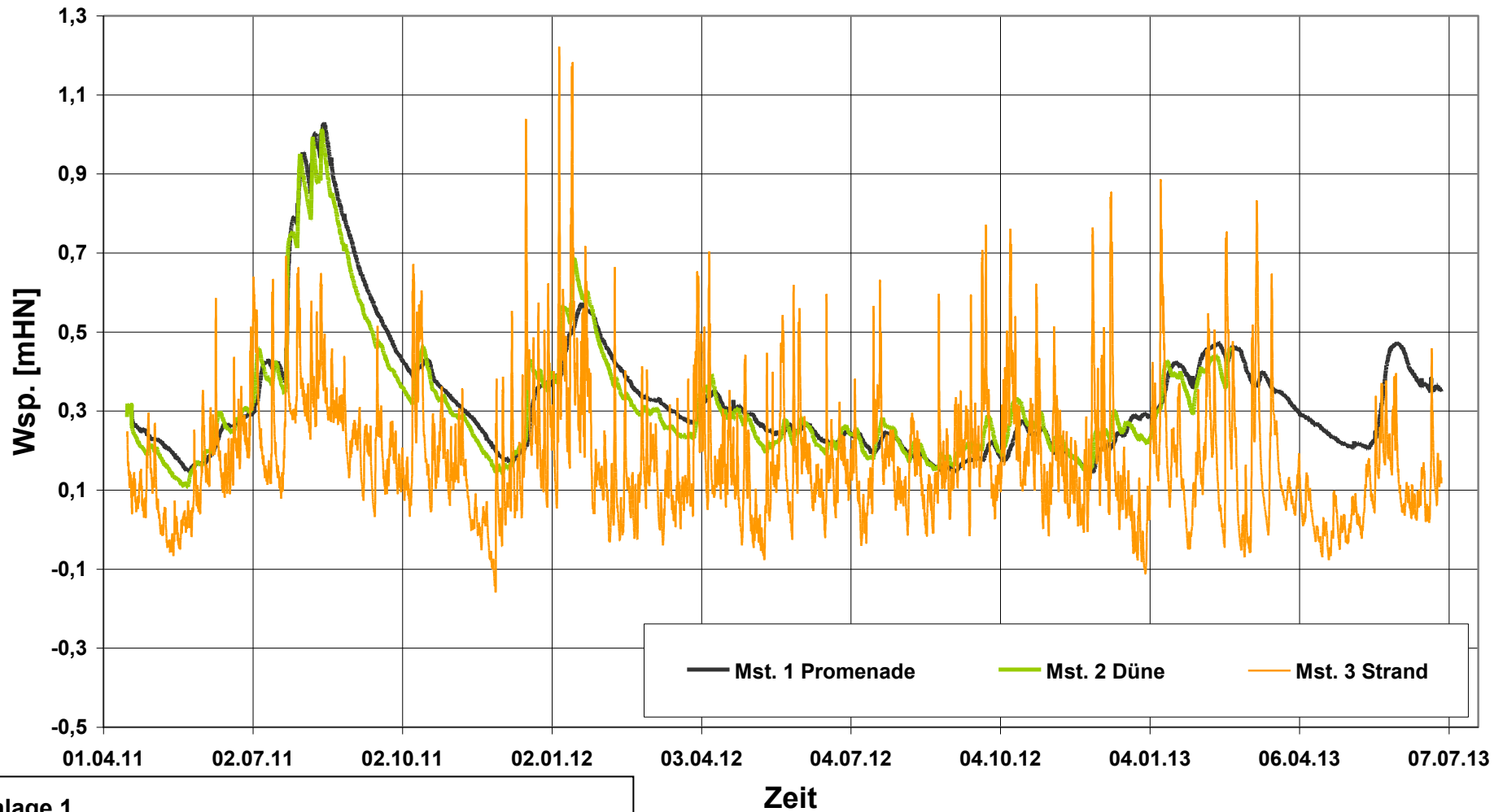


Anlage 1

RADOST Anwendungsprojekt 16 „Küstenschutz u. Geothermie“

Messergebnisse

Ganglinien Wasserspiegel Mst. 1-3

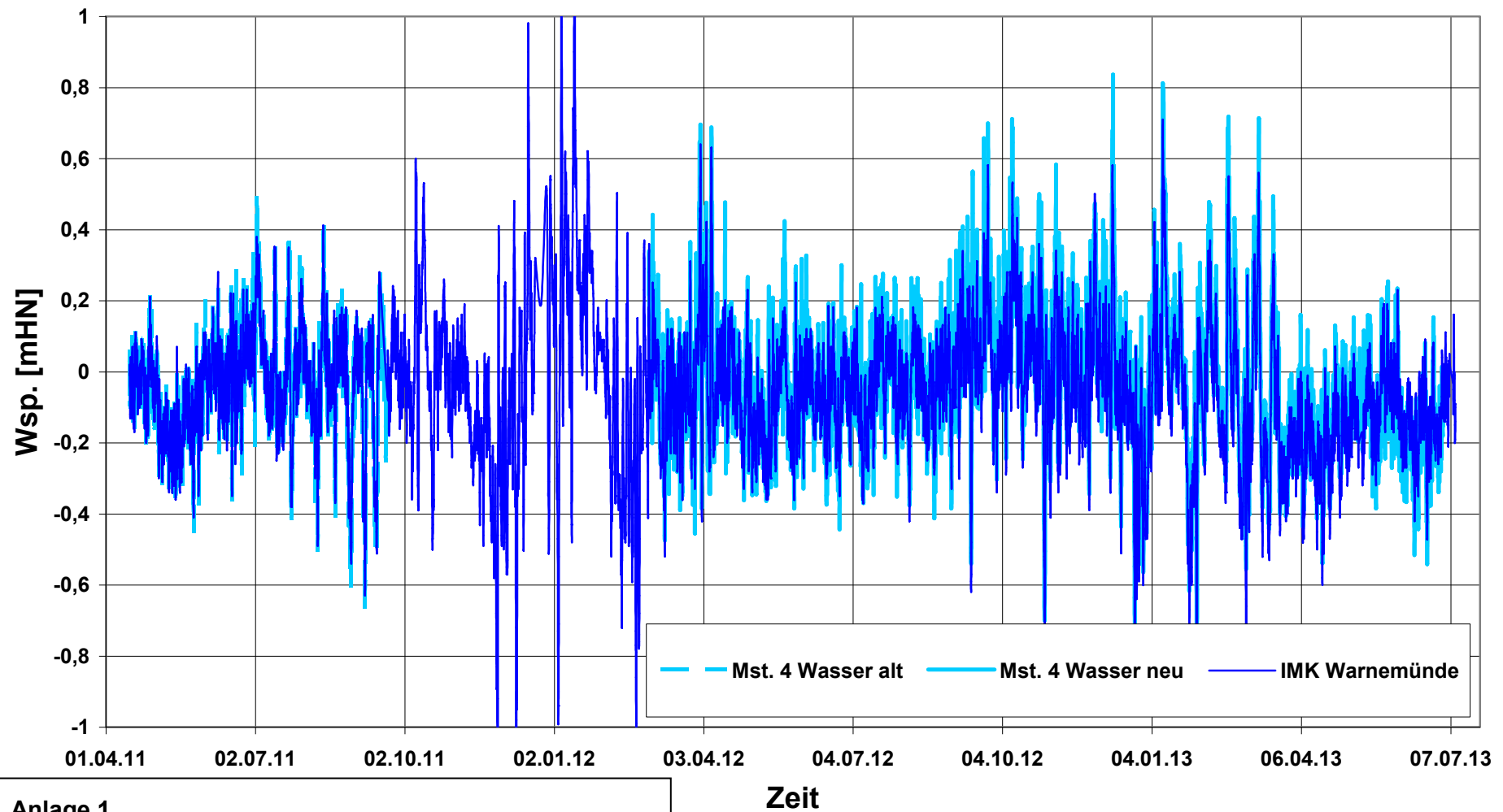


Anlage 1

RADOST Anwendungsprojekt 16 „Küstenschutz u. Geothermie“

Messergebnisse

Ganglinien Wasserspiegel (Ostsee)

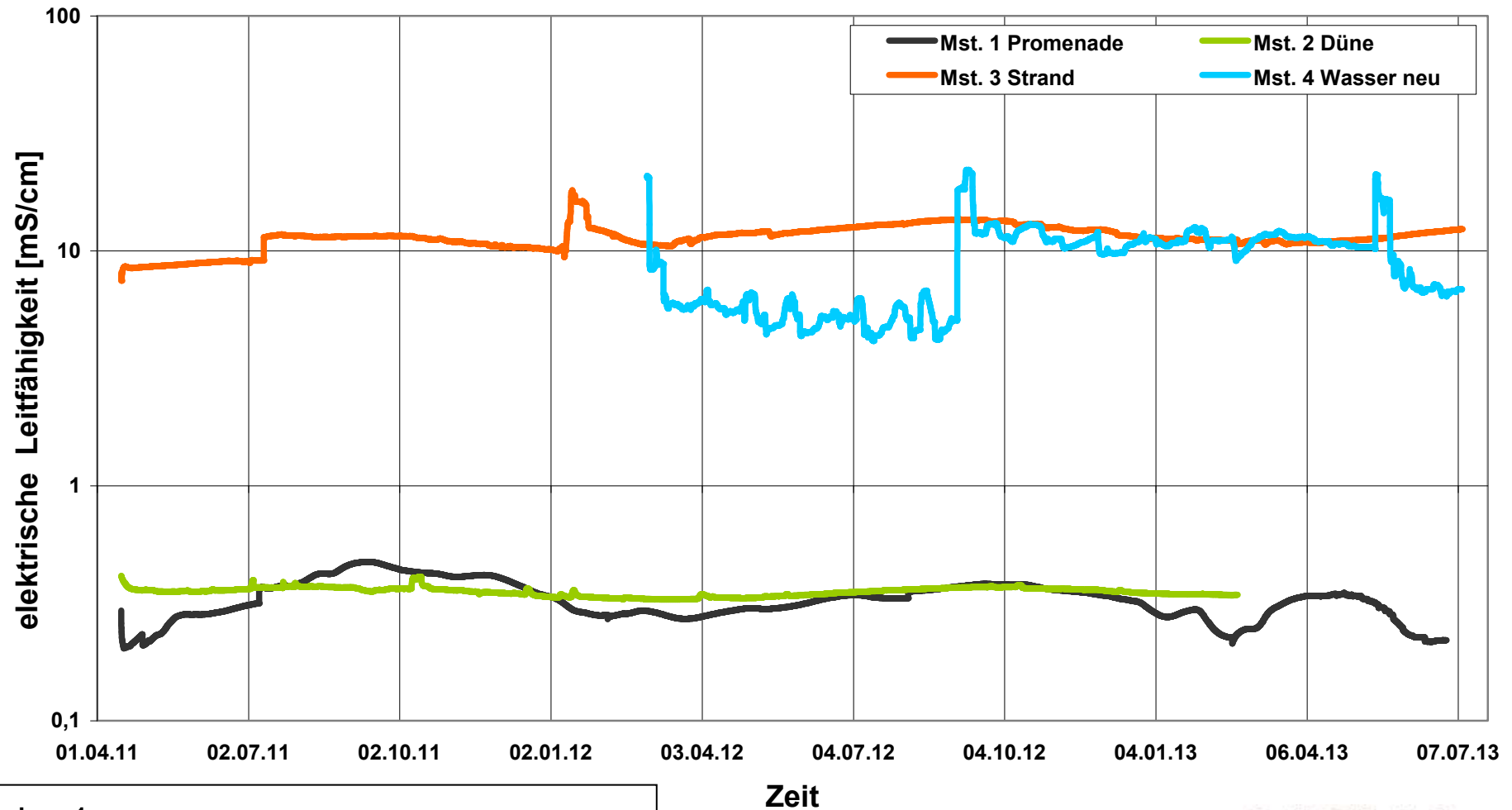


Anlage 1

RADOST Anwendungsprojekt 16 „Küstenschutz u. Geothermie“

Messergebnisse

Ganglinien elektrische Leitfähigkeit



Anlage 1

RADOST Anwendungsprojekt 16 „Küstenschutz u. Geothermie“

Messergebnisse

Anlage 2

Thermohydrodynamische Simulation von geothermischen Wärmeübertragern im Bereich von Küstenschutzanlagen

Projekt: **AWP 16, RADOST**

Geohydrologisches Schichtenmodell (**generalisiert**)

Slice	Schicht	Hinweise	Mächtigkeit [m]	Niveau [m NHN]	kh [m/s]	kv [m/s]	nutzbare Porosität [-]	Gesamt Porosität [-]	Wärmekapazität [J/m³ x K]	λ Fluid [W/m x K]	λ Solid [W/m x K]	λ eff [W/m x K]
1	Fein- bis Mittelsand	Geländeoberfläche	5	SRTM, (0,0 bis +5,0)	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0
2				SRTM - 0,1	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0
3				SRTM - 0,2	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0
4				SRTM - 0,3	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0
5		OK Spiralkollektor Verlegeebene		0,0	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0
6		Horizontal Kollektor		-1,0	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0
7				-2,0	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0
8		UK Spiralkollektor Verlegeebene Horizontalbrunnen		-3,0	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0
9	Geschiebemergel (fs, ms)	Buffer	5	-4,0	1,00E-07	5,00E-08	0,05	0,30	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,0	1,6
10				-5,0	1,00E-07	5,00E-08	0,05	0,30	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,0	1,6
11				-8,0	1,00E-07	5,00E-08	0,05	0,30	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,0	1,6
12		Buffer		-9,0	1,00E-07	5,00E-08	0,05	0,30	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,0	1,6
13	Feinsand (ms, u)	Buffer		-10,0	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0
14		Modelluntergrenze		-24,0	2,00E-04	1,00E-04	0,20	0,25	Fluid 4.2 ; Solid 2.52	0,6	2,5	2,0

Anlage 3

Die graphische Ergebnisdarstellung der durchgeführten thermohydrodynamischen Simulationen gliedert sich wie folgt: Küstenabschnitt Düne \Rightarrow Strand \Rightarrow Wasser; Wärmeübertrager: Erdreichkollektor \Rightarrow Spiralsonden \Rightarrow Horizontalbrunnen.

I. Untersuchungsbereich Düne:

a) Horizontaler Erdreichkollektor

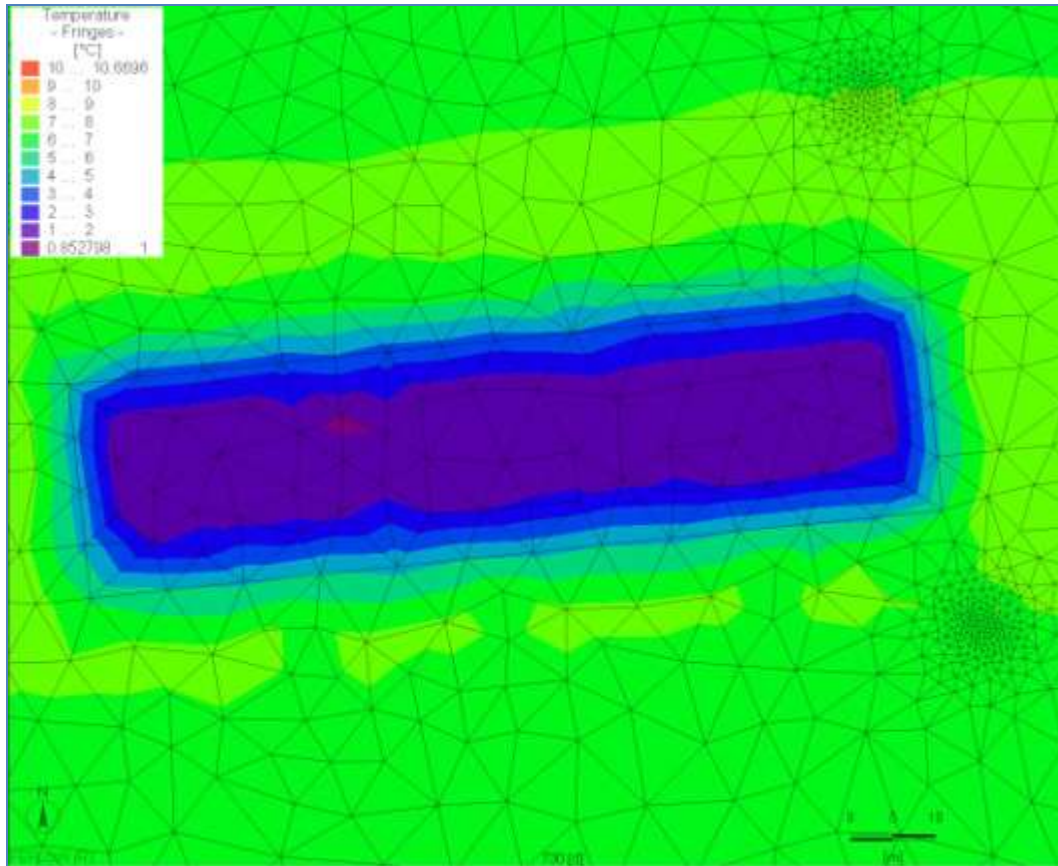


Abb. 1: Prognostizierte Temperaturen Ende April (Heizfall), Modellebene Wärmeübertrager (ca. 4,5...5,0 m u. GOK)

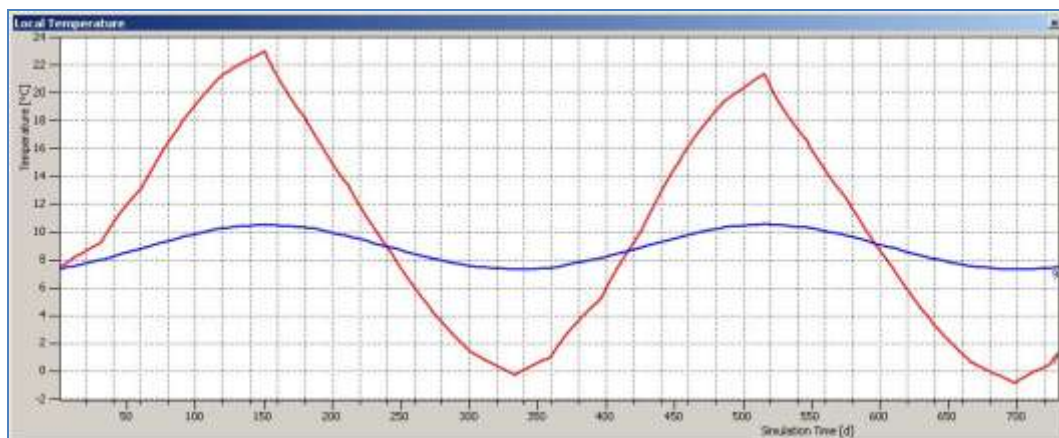


Abb. 2: Y-Achse = prognostizierte mittlere Fluidtemperaturen (rot) und ungestörte Untergrundtemperaturen (blau); X-Achse = Simulationszeit in Tagen, Heiz- und Kühlbetrieb

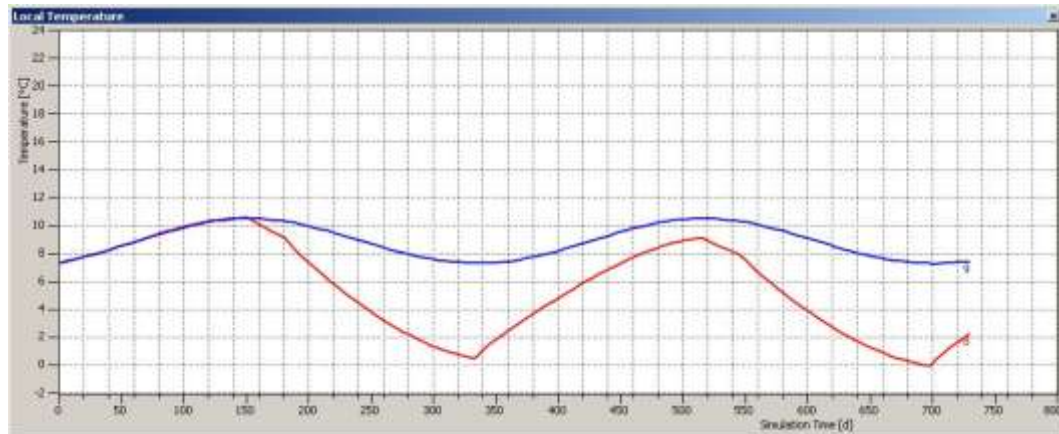


Abb. 3: Y-Achse = prognostizierte mittlere Fluidtemperaturen (rot) und ungestörte Untergrundtemperatur (blau); X-Achse = Simulationszeit in Tagen, **ausschließlicher Heizbetrieb**

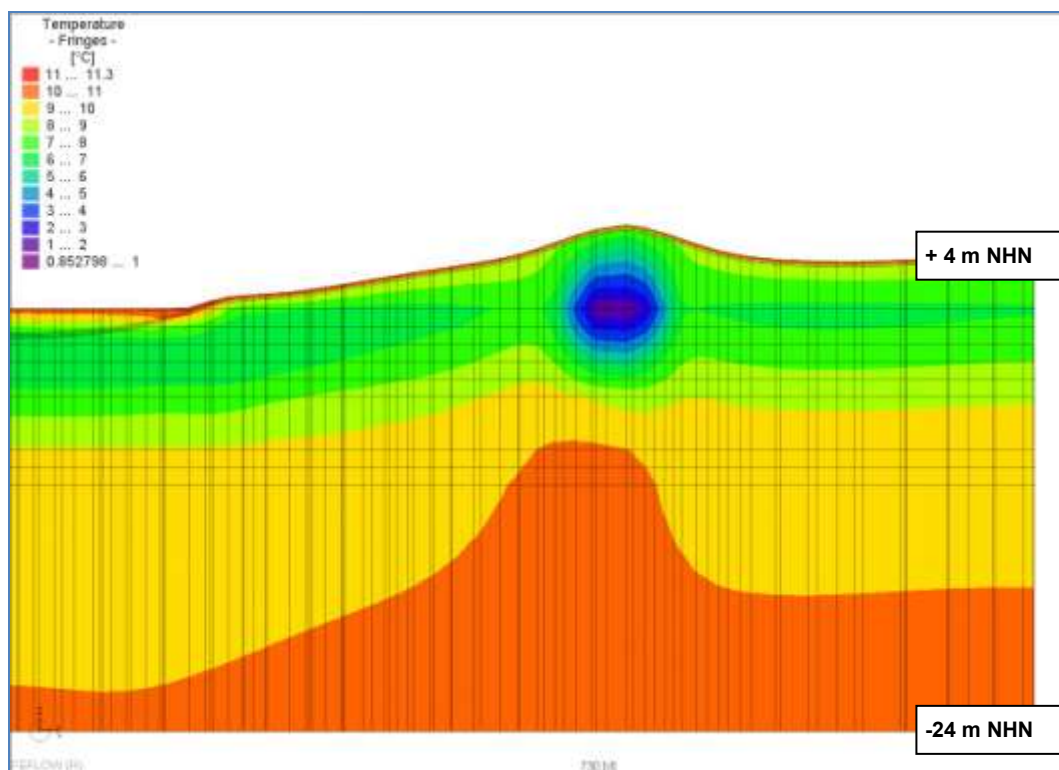


Abb. 4: Prognostizierte Temperaturverteilung Ende April (Heizfall), Profilschnitt S-N

b) Vertikale Spiralkollektoren

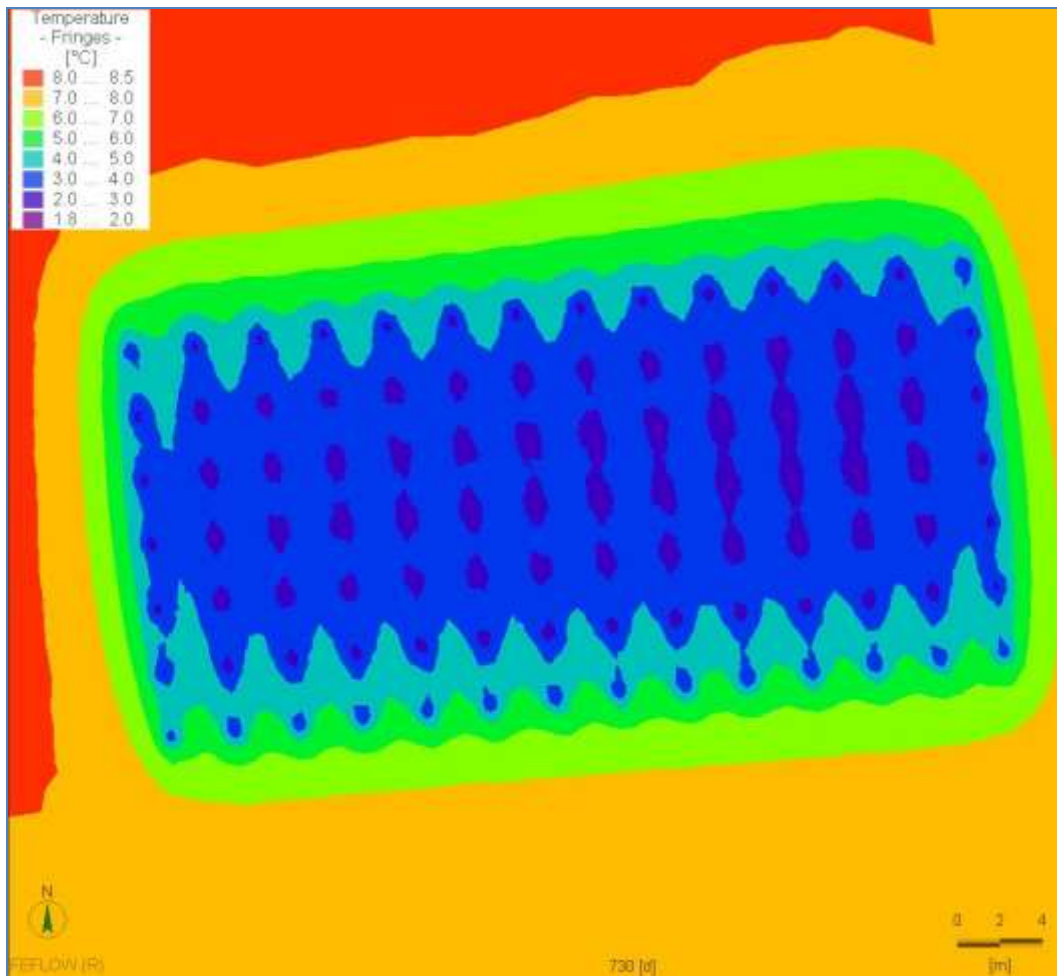


Abb. 5: Prognostizierte Temperaturen Ende April (Heizfall), Modellebene OK Wärmeübertrager (ca. 4,5...5,0 m u. GOK)

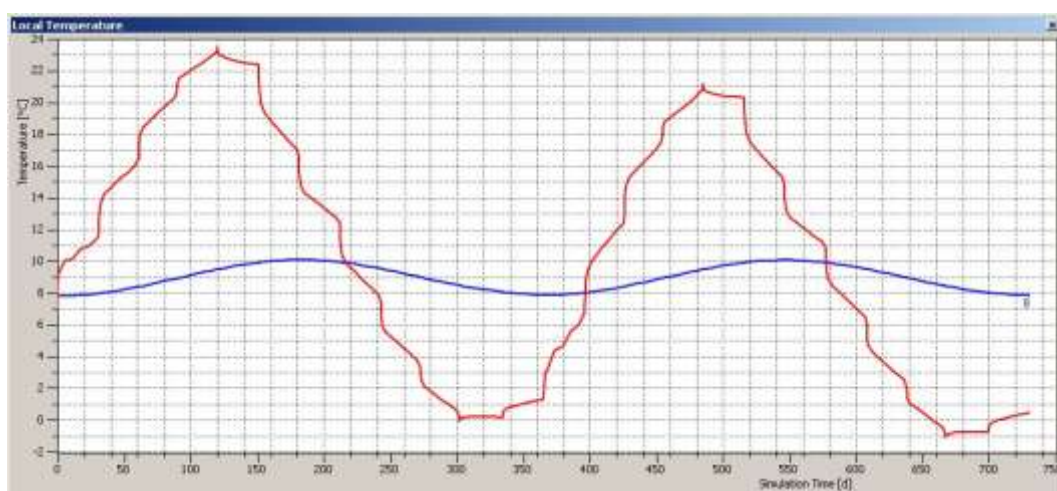


Abb. 6: Y-Achse = prognostizierte mittlere Fluidtemperaturen (rot) und ungestörte Untergrundtemperatur (blau); X-Achse = Simulationszeit in Tagen, **Heiz- und Kühlbetrieb**

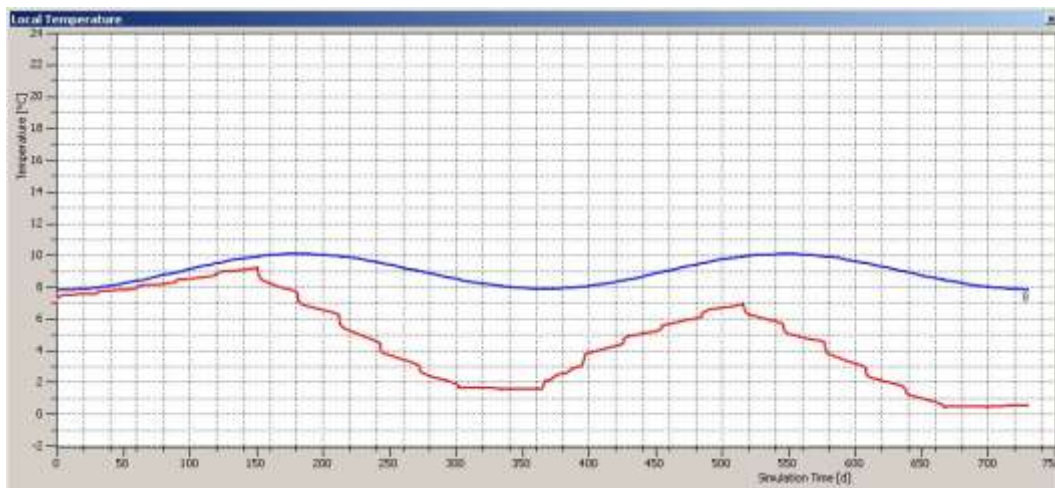


Abb. 7: Y-Achse = prognostizierte mittlere Fluidtemperaturen (rot) und ungestörte Untergrundtemperatur (blau); X-Achse = Simulationszeit in Tagen, **ausschließlicher Heizbetrieb**

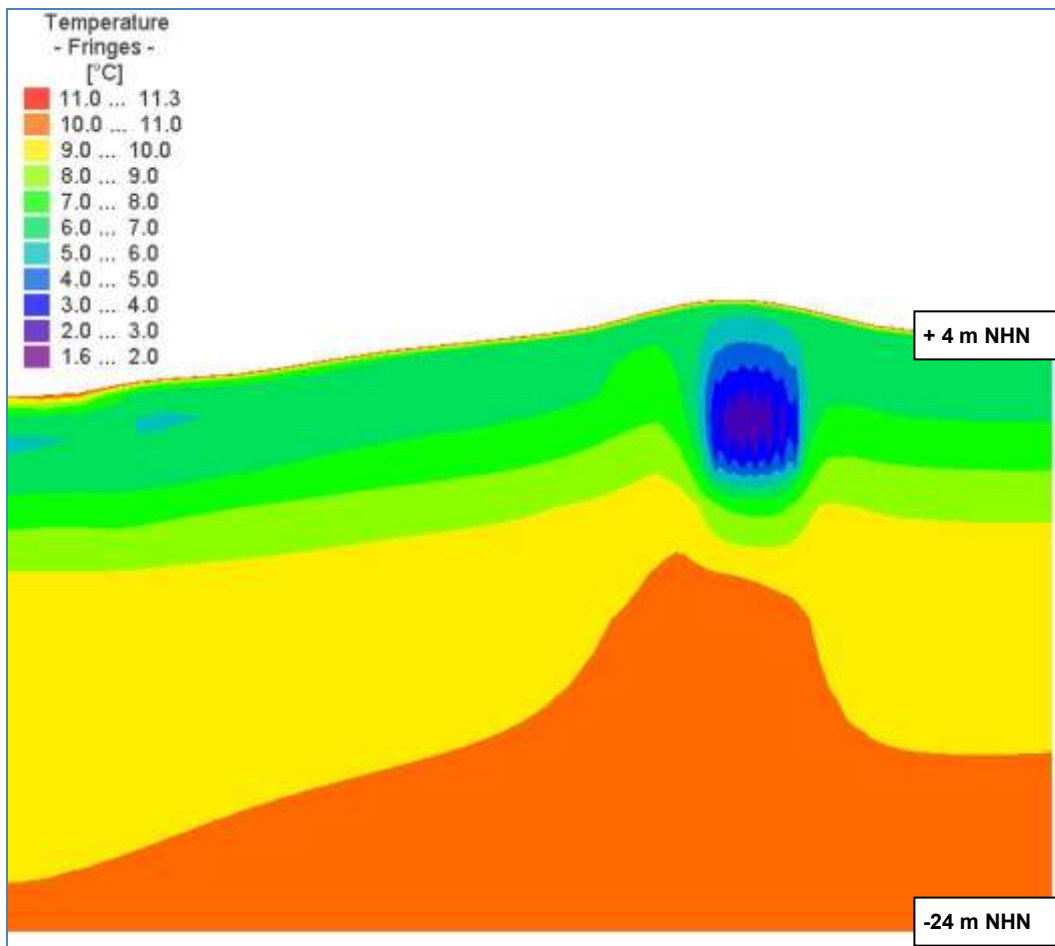


Abb. 8: Prognostizierte Temperaturverteilung Ende April (Heizfall), Profilschnitt S-N

c) Horizontalbrunnen

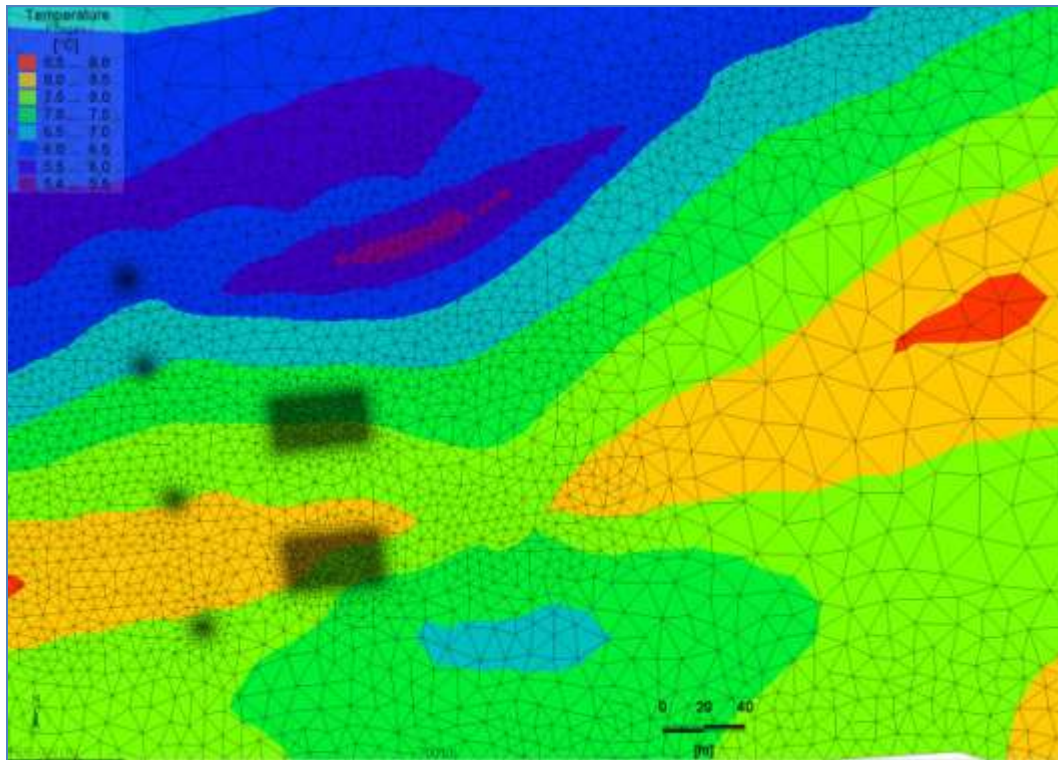


Abb. 9: Prognostizierte Temperaturen Ende April (Heizfall), Modellebene Brunnenfilter (ca. 7,5...8,0 m u. GOK)

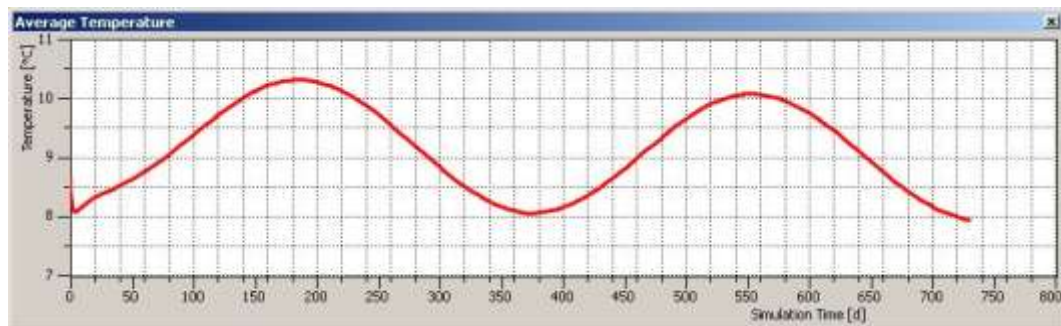


Abb.10: Y-Achse = prognostizierte Entnahmetemperaturen Grundwasser (rot); X-Achse = Simulationszeit in Tagen

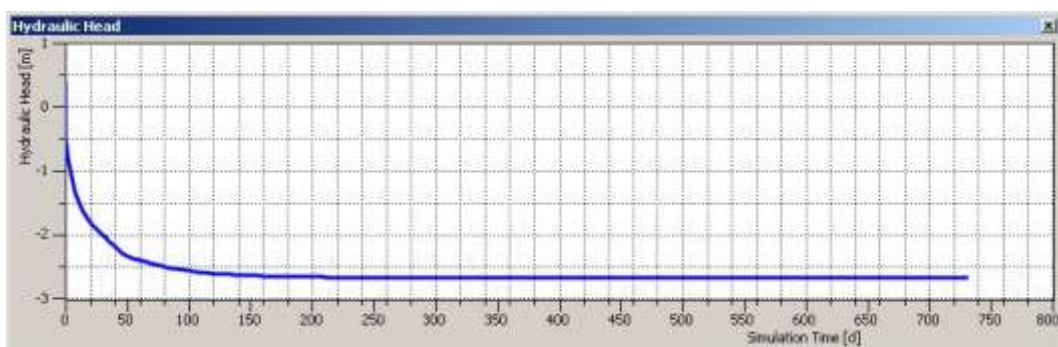


Abb. 11: Y-Achse = prognostizierte Grundwasserabsenkung im Bereich des Brunnenfilters (blau) X-Achse = Simulationszeit in Tagen ($Q = 400 \text{ m}^3/\text{d}$)

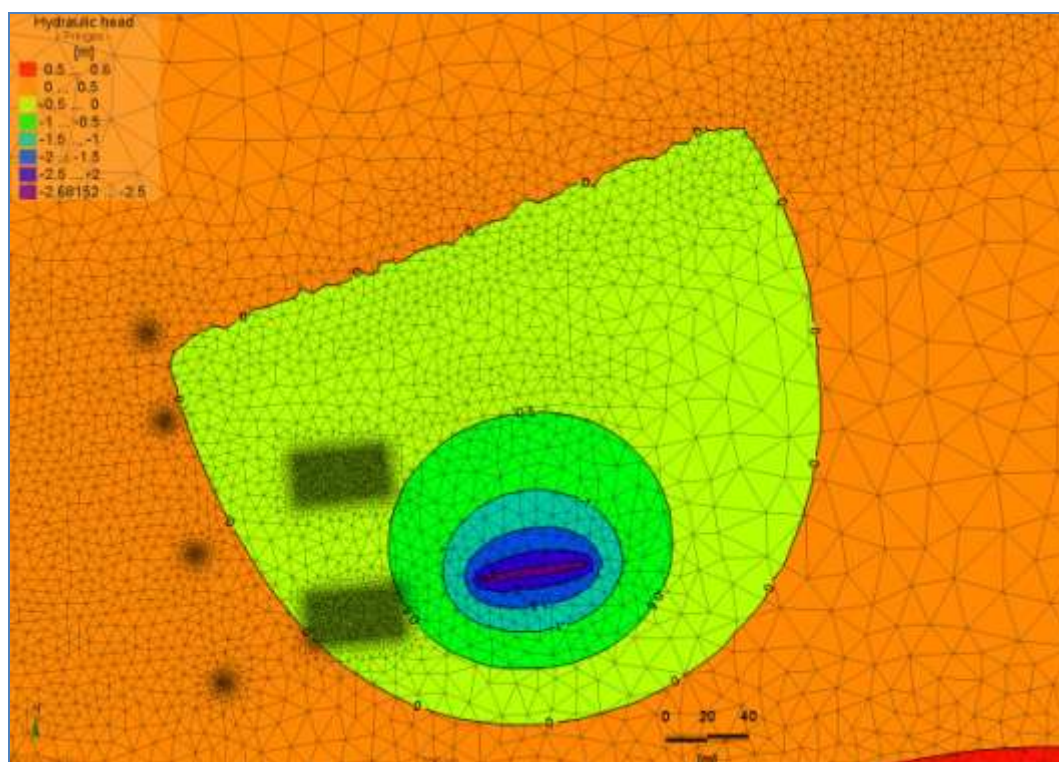


Abb. 12: Prognostizierter Absenkungsbereich Grundwasser (hydraulische Drucklinien), Grundriss Filterebene ($Q = 400 \text{ m}^3/\text{d}$)

II. Untersuchungsbereich Strand:

d) Horizontaler Erdreichkollektor

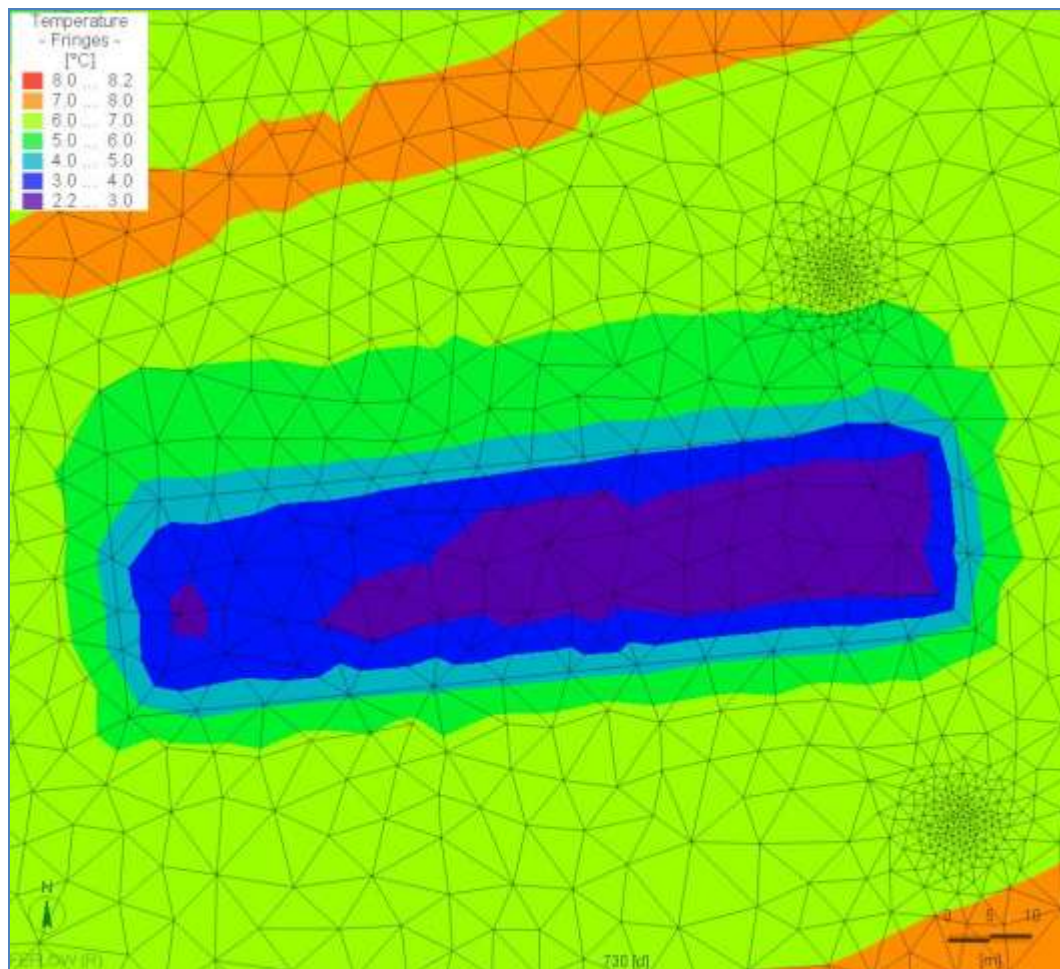


Abb. 13: Prognostizierte Temperaturen Ende April (Heizfall), Modellebene Wärmeübertrager (ca. 2,0 m u. GOK)

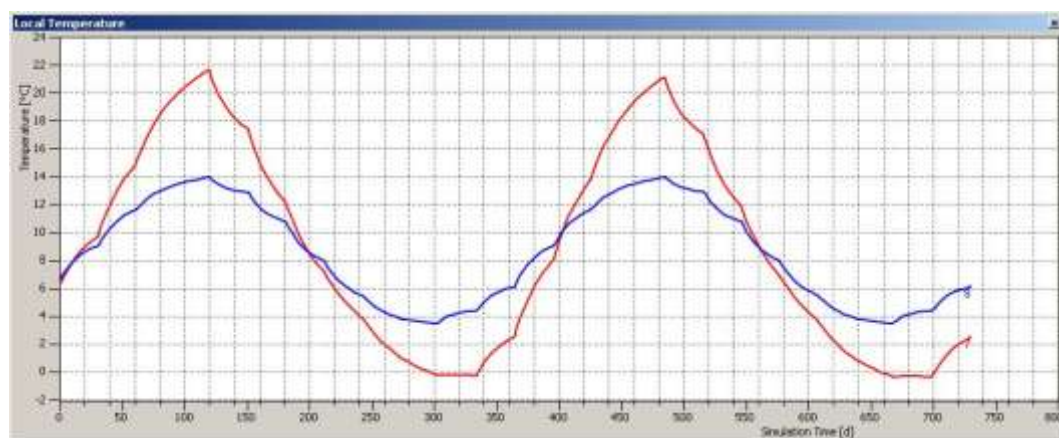


Abb. 14: Y-Achse = prognostizierte mittlere Fluidtemperaturen (rot) und ungestörte Untergrundtemperatur (blau); X-Achse = Simulationszeit in Tagen, **Heiz- und Kühlbetrieb**

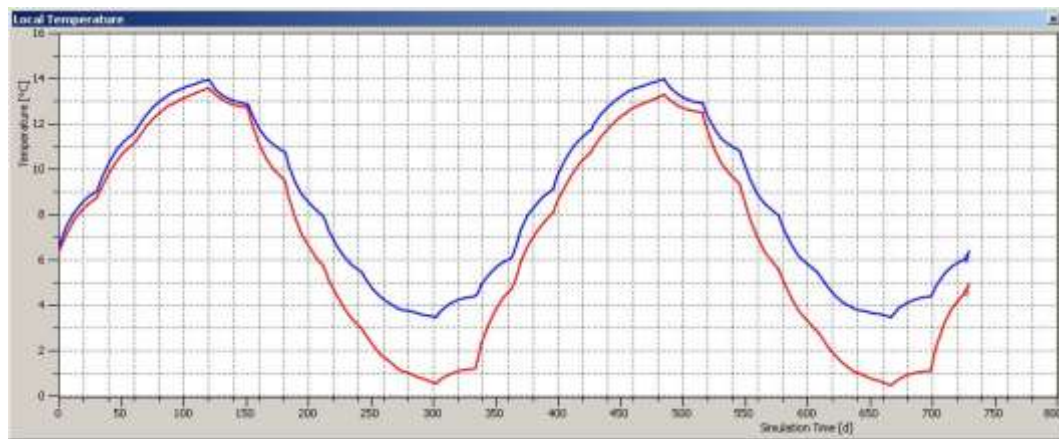


Abb. 15: Y-Achse = prognostizierte mittlere Fluidtemperaturen (rot) und ungestörte Untergrundtemperatur (blau); X-Achse = Simulationszeit in Tagen, **ausschließlicher Heizbetrieb**

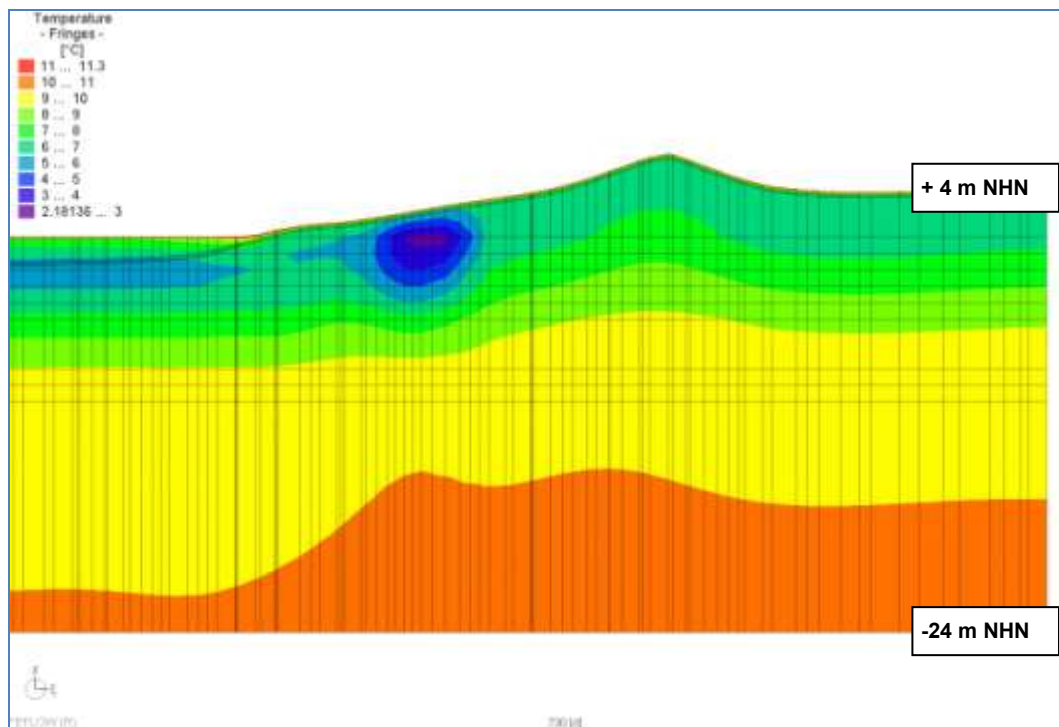


Abb. 16: Prognostizierte Temperaturverteilung Ende April (Heizfall), Profilschnitt S-N

e) Vertikale Spiralkollektoren

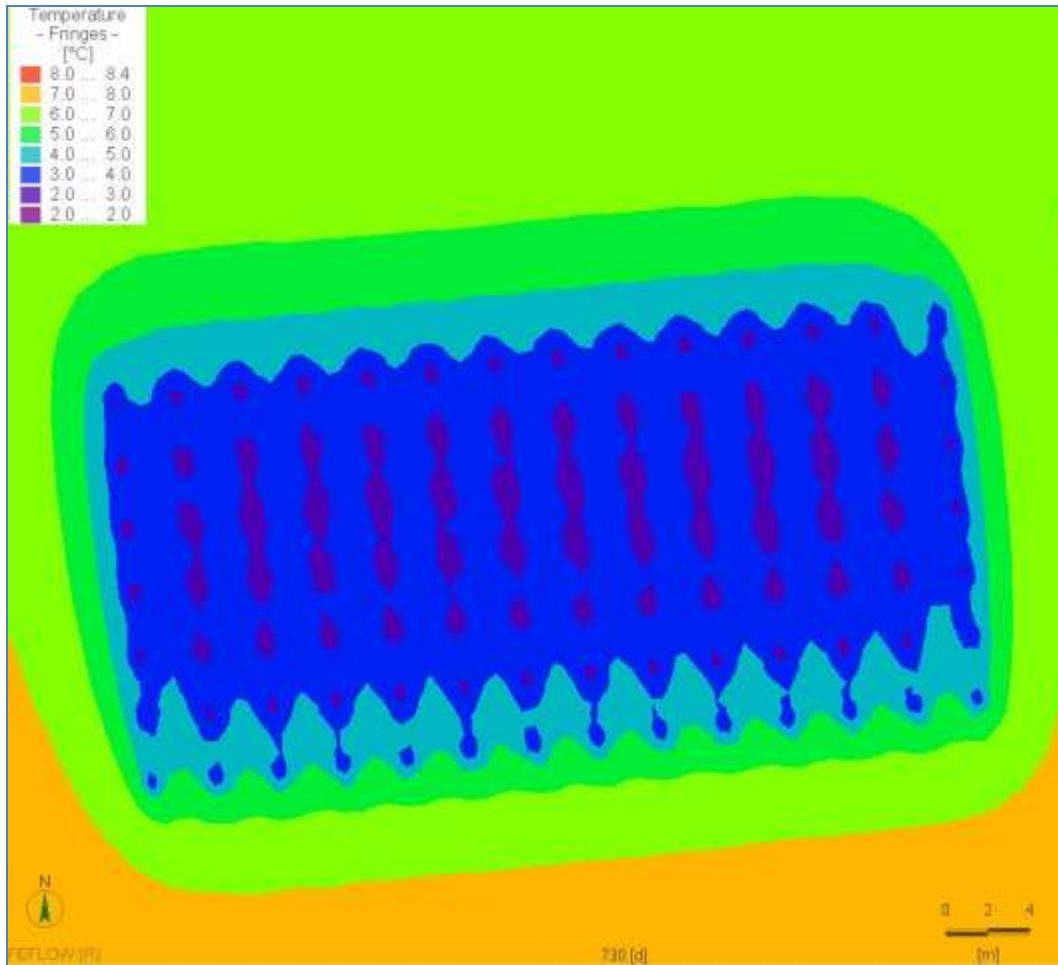


Abb. 17: Prognostizierte Temperaturen Ende April (Heizfall), Modellebene OK Wärmeübertrager (ca. 2,0 m u. GOK)

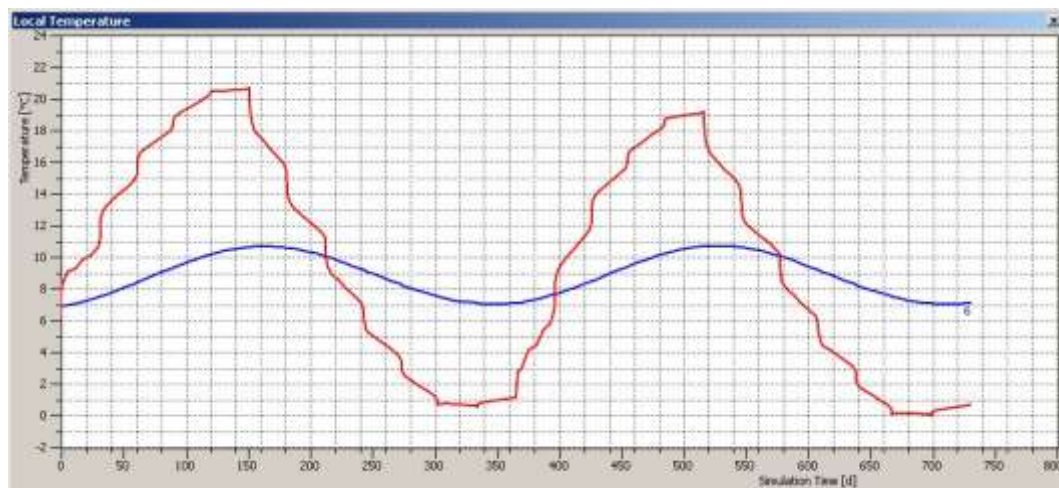


Abb. 18: Y-Achse = prognostizierte mittlere Fluidtemperaturen (rot) und ungestörte Untergrundtemperatur (blau); X-Achse = Simulationszeit in Tagen, **Heiz- und Kühlbetrieb**



Abb.19: Y-Achse = prognostizierte mittlere Fluidtemperaturen (rot) und ungestörte Untergrundtemperatur (blau); X-Achse = Simulationszeit in Tagen, **ausschließlicher Heizbetrieb**

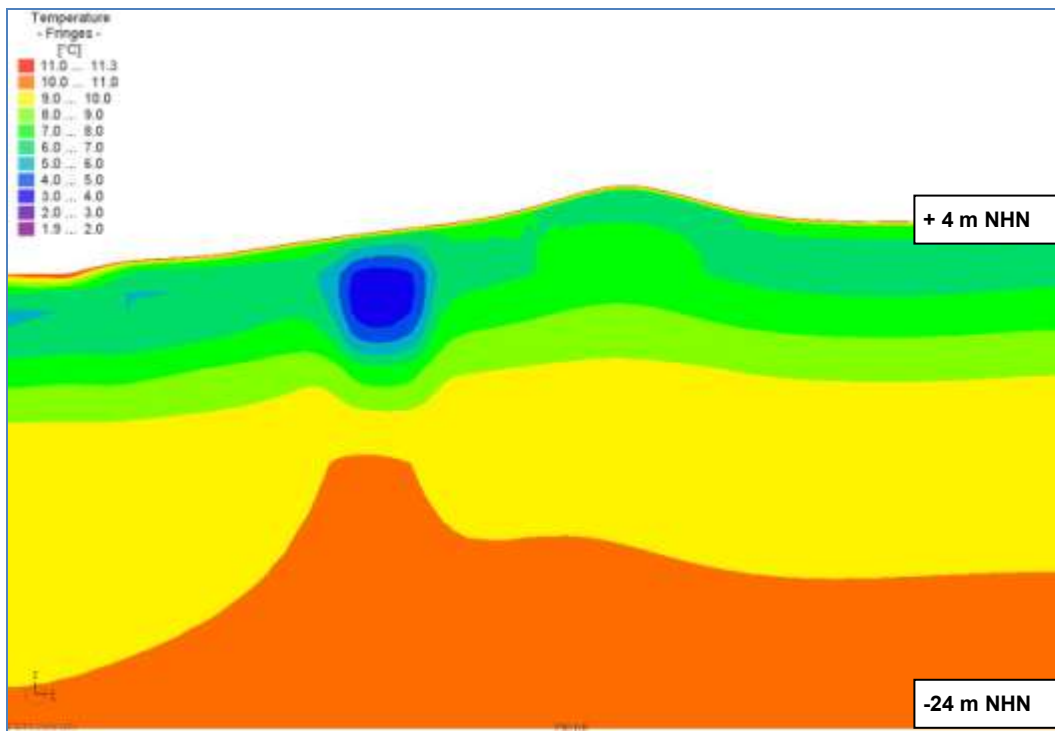


Abb. 20: Prognostizierte Temperaturverteilung Ende April (Heizfall), Profilschnitt S-N

f) Horizontalbrunnen

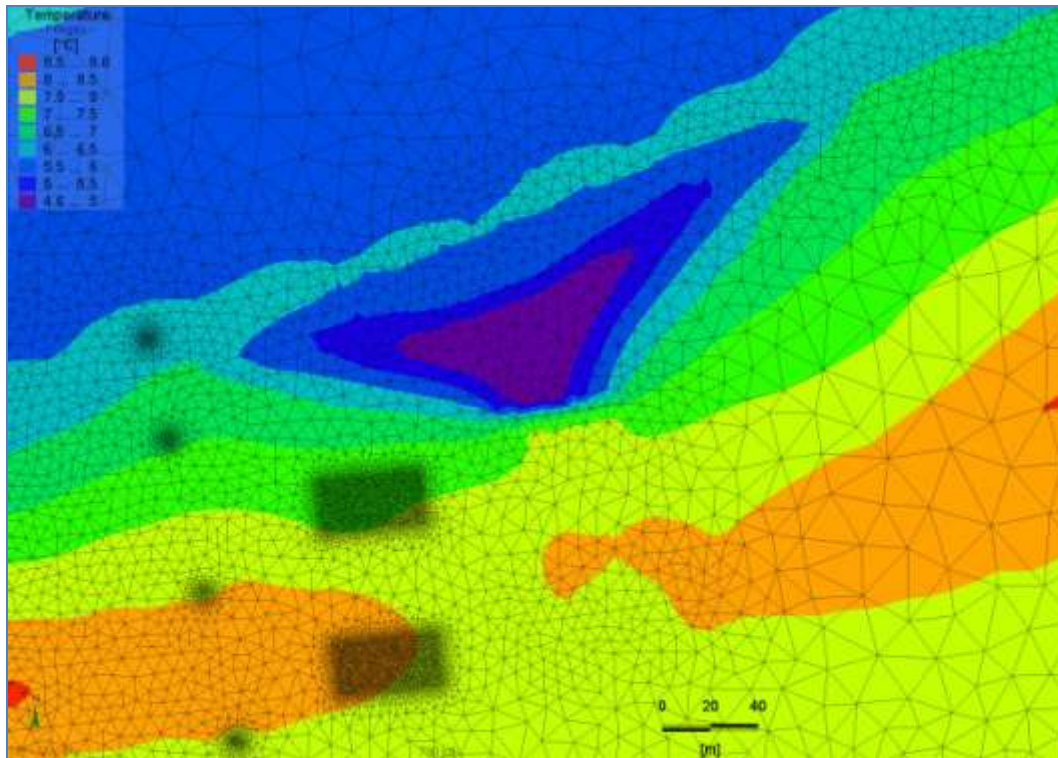


Abb. 21: Prognostizierte Temperaturen Ende April (Heizfall), Modellebene Brunnenfilter (ca. 4,5...5,0 m u. GOK)

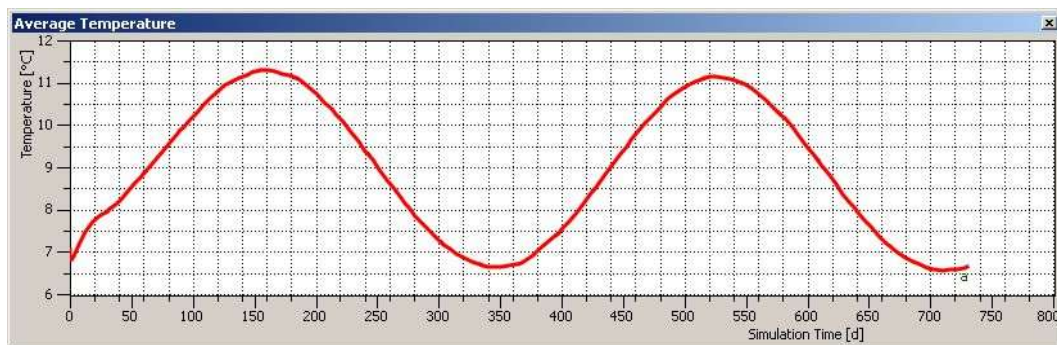


Abb. 22: Y-Achse = prognostizierte Entnahmetemperaturen Grundwasser (rot); X-Achse = Simulationszeit in Tagen

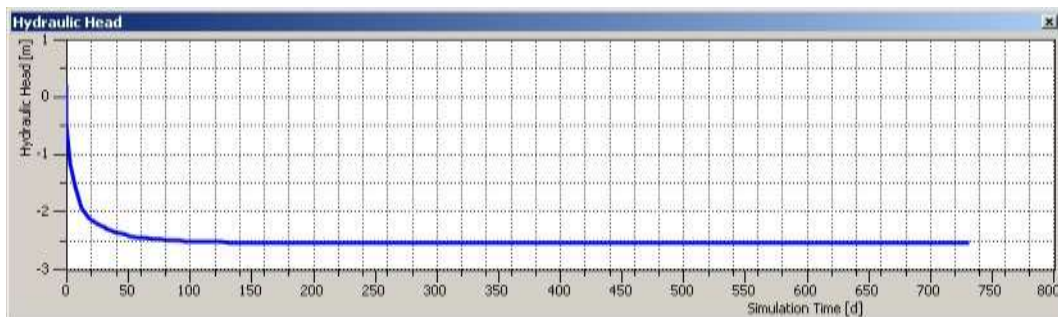


Abb. 23: Y-Achse = prognostizierte Grundwasserabsenkung im Bereich des Brunnenfilters (blau) X-Achse = Simulationszeit in Tagen ($Q = 400 \text{ m}^3/\text{d}$)

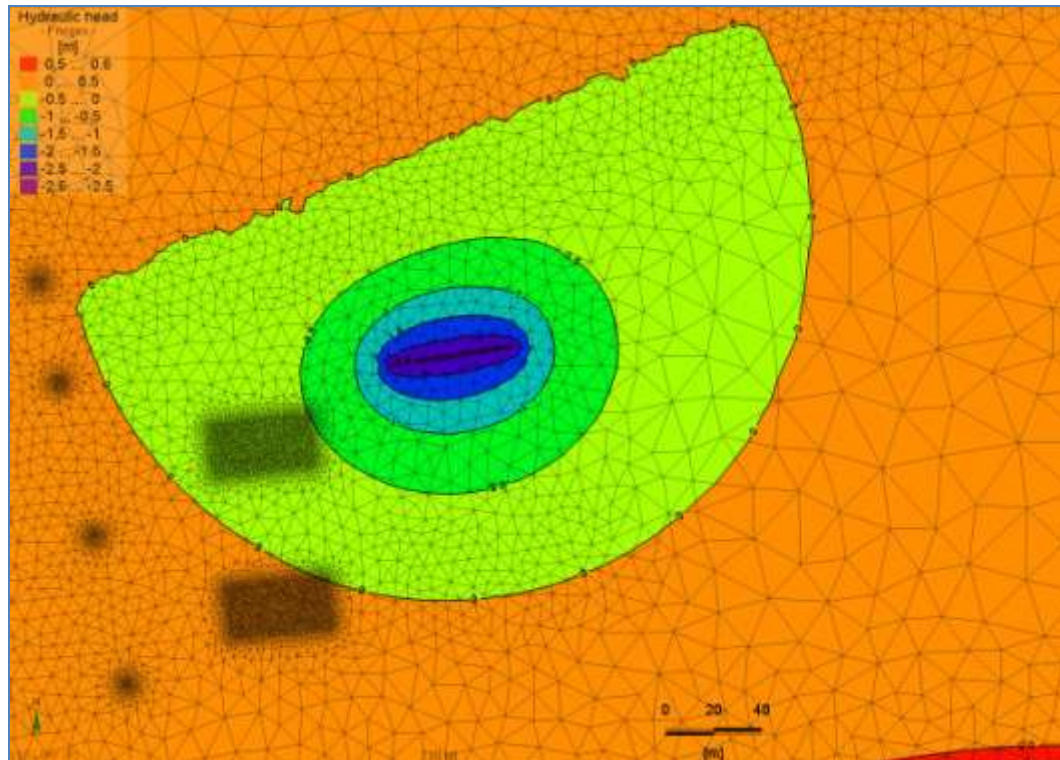


Abb. 24: Prognostizierter Absenkungsbereich Grundwasser (hydraulische Drucklinien), Grundriss Filterebene ($Q = 400 \text{ m}^3/\text{d}$)

III. Untersuchungsbereich Wasser:

g) Horizontaler Erdreichkollektor

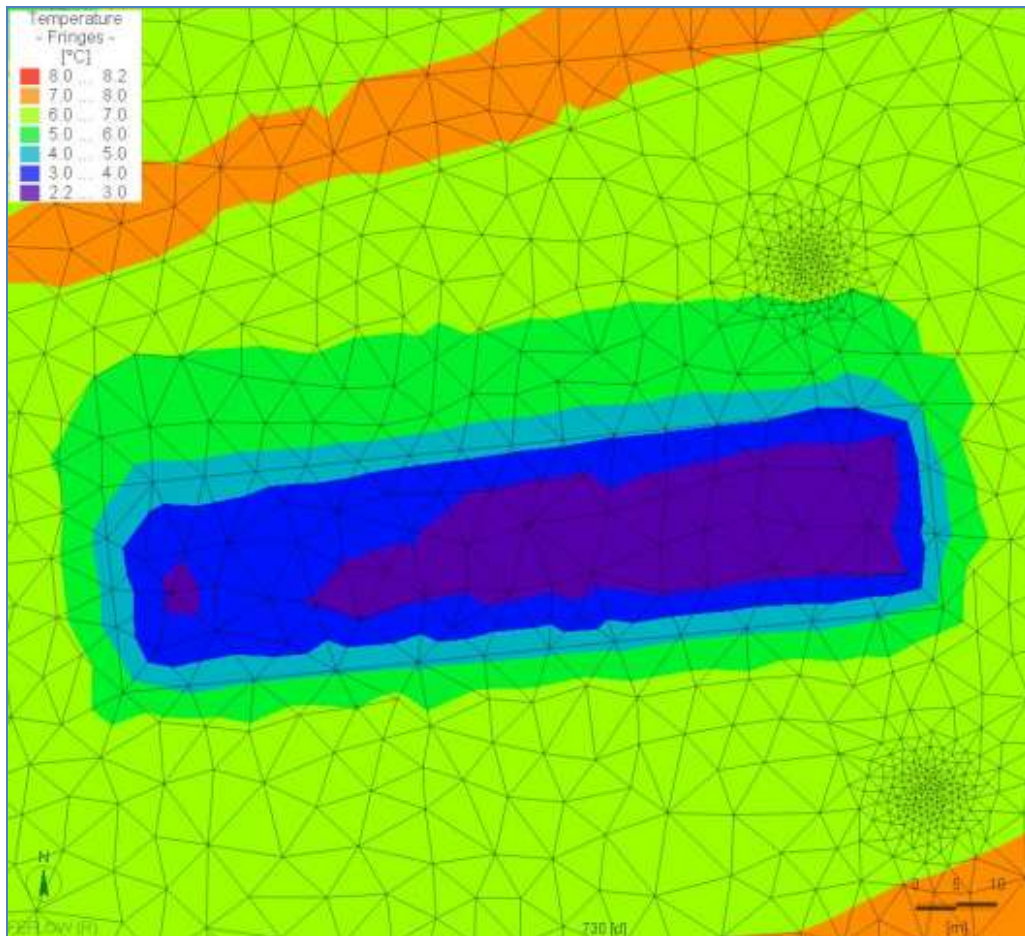


Abb. 25: Prognostizierte Temperaturen Ende April (Heizfall), Modellebene Wärmeübertrager (ca. 0,5 bis ca. 1,5 m u. Seegrund)



Abb. 26: Y-Achse = prognostizierte mittlere Fluidtemperaturen (rot) und ungestörte Untergrundtemperatur (blau); X-Achse = Simulationszeit in Tagen, **Heiz- und Kühlbetrieb**

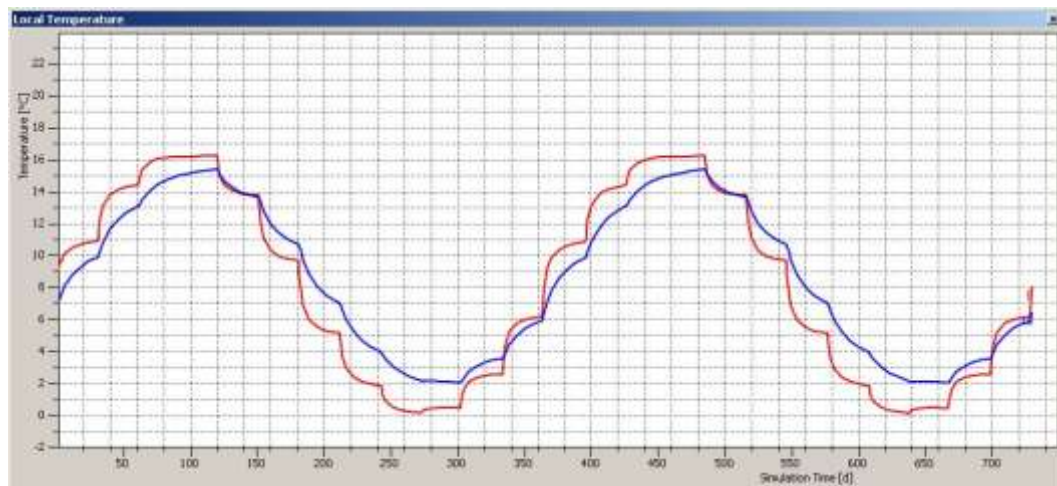


Abb. 27: Y-Achse = prognostizierte mittlere Fluidtemperaturen (rot) und ungestörte Untergrundtemperatur (blau); X-Achse = Simulationszeit in Tagen, **ausschließlicher Heizbetrieb**

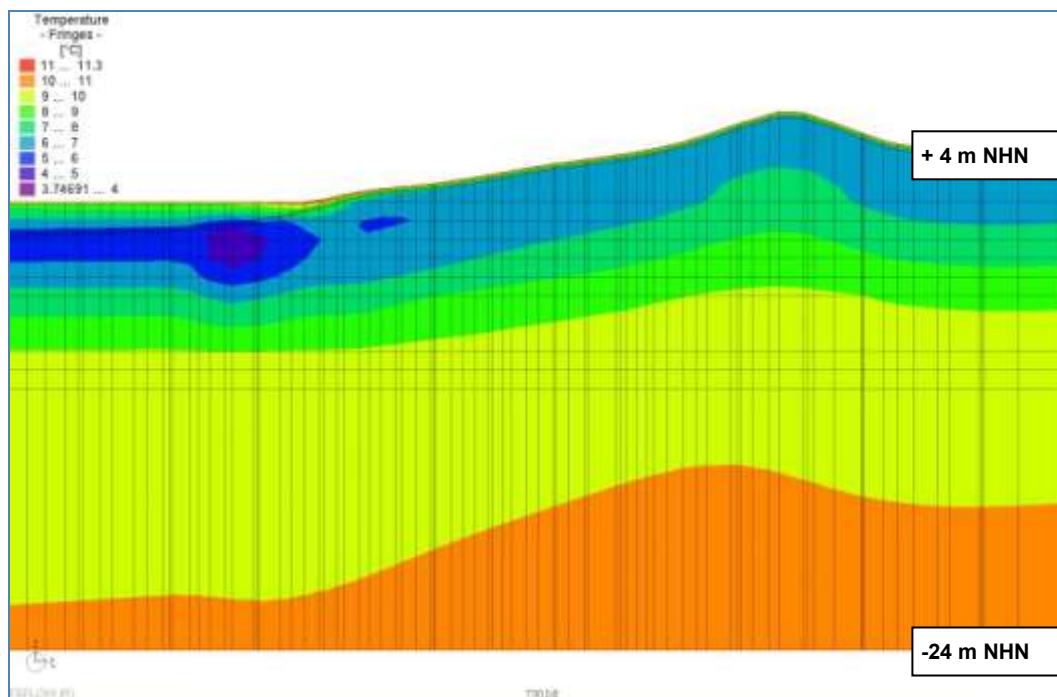


Abb. 28: Prognostizierte Temperaturverteilung Ende April (Heizfall), Profilschnitt S-N

h) Vertikale Spiralkollektoren

Hinweis: Spiralkollektoren sind im Bereich des Meeresgrundes nur mit großem technischem Aufwand (verrohrte Bohrung) zu installieren und müssten zum Teil in den unterhalb der Sande anstehenden bindigen Geschiebemergel eingebracht werden (reduzierte Leistung, Gefahr von hydraulischen Kurzschlüssen). Deshalb wird das System *Spiralkollektoren* nicht zur Anwendung im Bereich des Meeresgrundes empfohlen und in diesem Bereich auch nicht weiter betrachtet.

i) Horizontalbrunnen

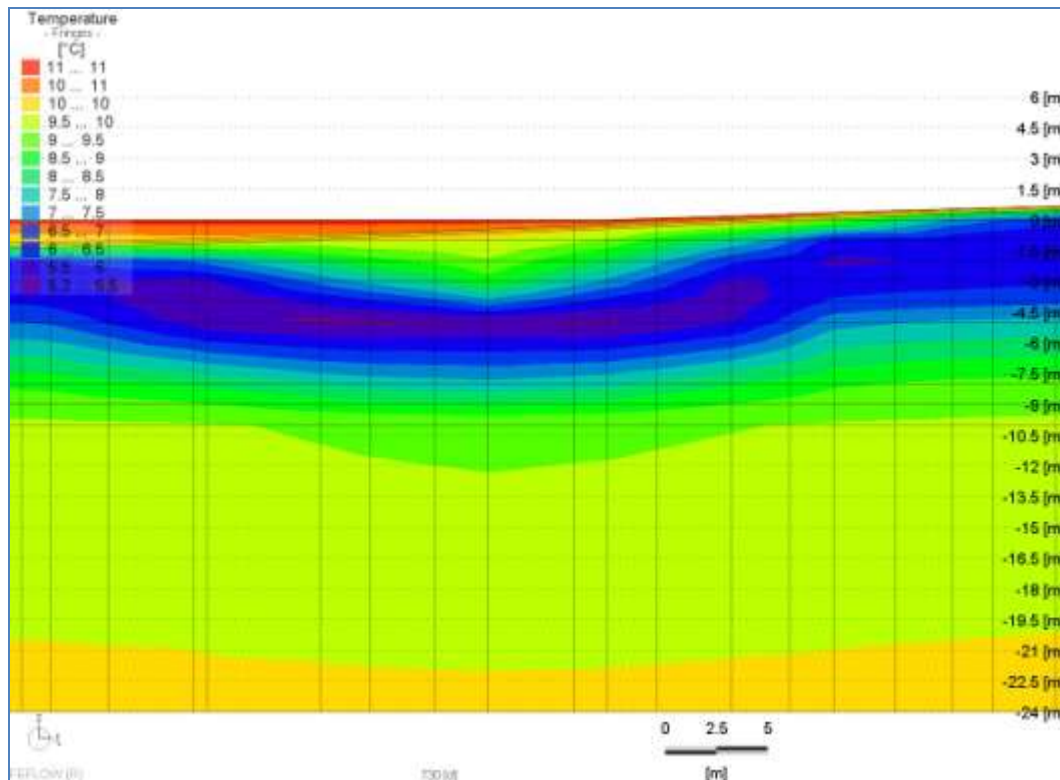


Abb. 29: Prognostizierte Temperaturverteilung Ende April (Heizfall), Profilschnitt S-N

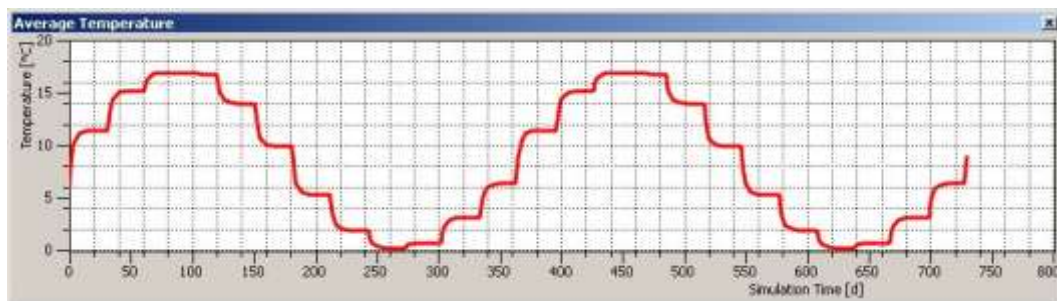


Abb. 30: Y-Achse = prognostizierte Entnahmetemperaturen Grundwasser (rot); X-Achse = Simulationszeit in Tagen

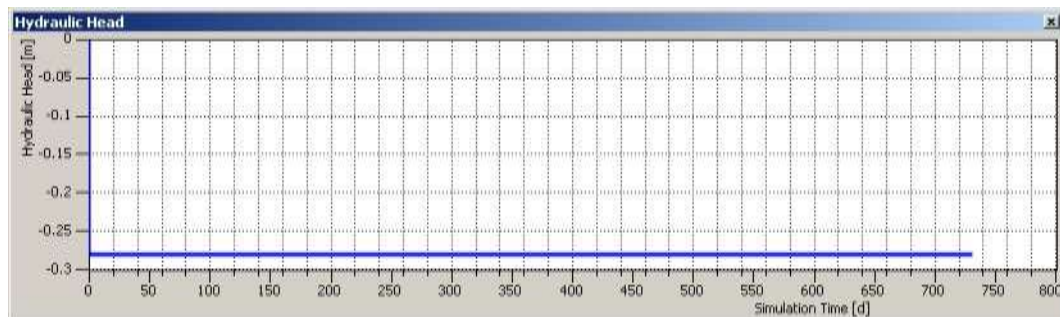


Abb. 31: Y-Achse = prognostizierter Druckabfall im Bereich des Brunnenfilters (blau) X-Achse = Simulationszeit in Tagen ($Q = 400 \text{ m}^3/\text{d}$)

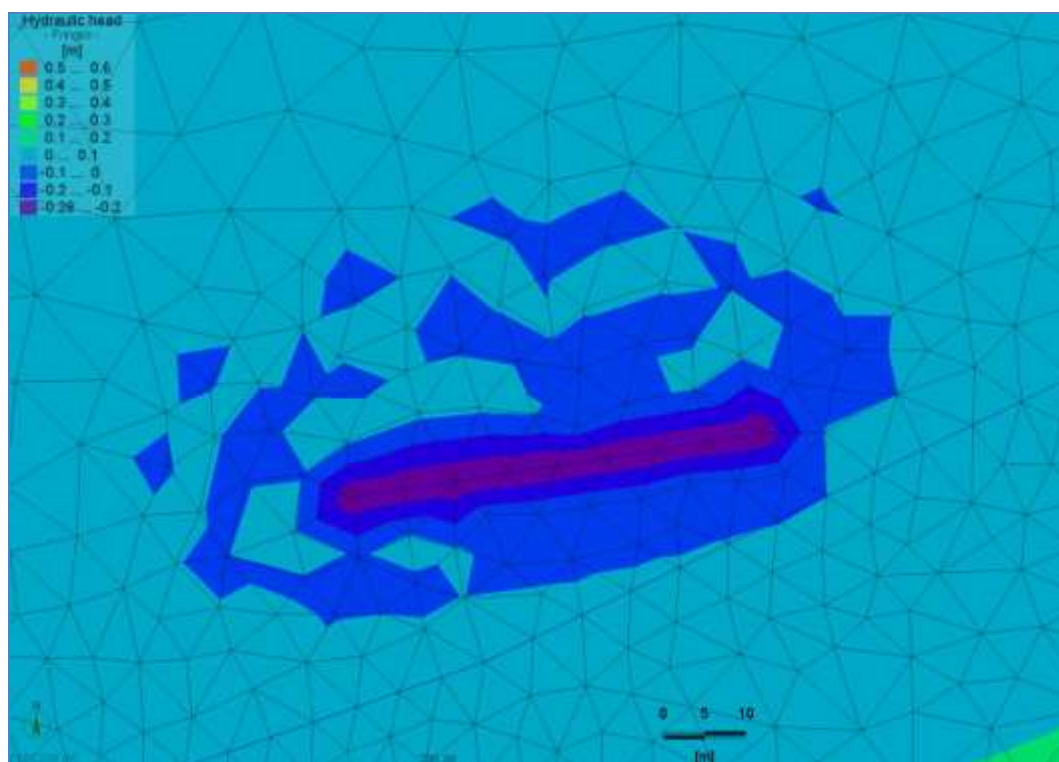


Abb. 32: Prognostizierter hydraulischer Druckabfall; Grundriss Filterebene ($Q = 400 \text{ m}^3/\text{d}$)

Impressum

Herausgeber

Ecologic Institut gemeinnützige GmbH
Pfalzburger Str. 43/44
10717 Berlin
www.ecologic.eu

Inhalt erstellt durch:

H.S.W. Ingenieurbüro
Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH

Gerhart-Hauptmann-Straße 19
D-18055 Rostock
Telefon: +49 (0) 381. 252898-10
Fax: +49 (0) 381. 252898-20
E-Mail: info@hsw-rostock.de
www.hsw-rostock.de

Web

<http://www.klimzug-radost.de>

Bildrechte

Wie angegeben. Alle anderen Bilder © H.S.W.

ISSN 2192-3140

Das Projekt „Regionale Anpassungsstrategien für die deutsche Ostseeküste“ (RADOST) wird im Rahmen der Maßnahme „Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten“ (KLIMZUG) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert

